

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektroniky a informatiky
Katedra elektroniky

Jednofázový usměrňovač řízený mikroprocesorem
Single-phase Rectifier Controlled by a
Microprocessor

Zadání bakalářské práce

Student:

Petr Chamrád

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2602R014 Aplikovaná a komerční elektronika

Téma:

Jednofázový usměrňovač řízený mikroprocesorem
Single-phase Rectifier Controlled by a Microprocessor

Zásady pro vypracování:

1. Popište problematiku fázového řízení jednofázového usměrňovače. Zaměřte se na možnosti číslicového řízení.
2. Podle požadavků vedoucího navrhnete a realizujete řídicí jednotku s mikroprocesorem.
3. Správnou funkčnost realizované jednotky ověříte měřením.

Seznam doporučené odborné literatury:

Dle pokynů vedoucího závěrečné práce

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

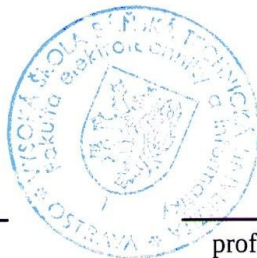
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Pavelek, Ph.D.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě, dne 7. 5. 2013

..... Petr Chmád

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce ing. Tomáši Pavelkovi, Ph.D. za odborné rady při návrhu a realizaci praktické části práce.

Abstrakt:

Práce je v úvodu zaměřena na problematiku fázového řízení tyristorových (řízených) usměrňovačů v oblasti analogového řízení jak s pasivními členy, tak s aktivními členy pro vysvětlení základních principů spouštění tyristorů. Dále je popsána možnost číslicového řízení usměrňovačů pomocí mikroprocesoru a jejich výhody v porovnání s konvenčními systémy. Hlavní cíl práce je pak návrh a realizace číslicově ovládané řídicí jednotky pro jednofázové tyristorové usměrňovače, která by mohla sloužit pro laboratorní účely k vysvětlení dané problematiky. Dále bylo provedeno zkušební měření s připojeným tyristorovým usměrňovačem pro vyzkoušení schopnosti řídit tyristorový usměrňovač a případné odhalení slabín řídicí jednotky.

Klíčová slova:

Řízený usměrňovač, tyristorový usměrňovač, řízený mikroprocesorem, řídicí jednotka, fázové řízení, tyristor, mikroprocesor ATmega8

Abstract:

The introduction of the bachelor thesis is focused on the problems of phase control of the controlled rectifiers in the analog control area with both passive and active objects for explanation of element principles for thyristors launching. There is described the way of rectifier number control by microprocessor and its advantage in comparison with conventional systems. The main point of the bachelor thesis is the project and the realization of number control unit for single-phase thyristor rectifier that can be used for laboratory purpose. There is also the experimental measurement with the connected thyristor rectifier to test out the possibility of the controlling and to detect weak points if there are any.

Key words:

controlled rectifier, thyristor rectifier controlled by microprocessor, control unit, phase control, thyristor, microprocessor ATmega8

Seznam použitých symbolů:

α	°	řídící úhel
γ	°	bezpečnostní úhel řízení
φ	°	fázový posun
τ	s	časová konstanta vyjadřující zpoždění
I_d	A	střední hodnota proudu protékajícího usměrňovačem
i_d	A	okamžitá hodnota proudu zátěže
i_g	A	okamžitá hodnota hradlového proudu tyristoru
k	°/s	konstanta
n	-	konstanta časovače
t	s	čas (doba trvání - obecně)
T	s	délka periody
T_1	s	délka trvání periody střídavého napětí
T_2	s	délka trvání periody usměrněného napětí
t_α	s	čas sepnutí tyristoru (v souvislosti s fázovým řízením)
$t_{\tilde{c}}$	s	doba inkrementace časovače
t_T	s	délka periody jednoho hodinového cyklu mikrokontroléru
u_A	V	okamžitá hodnota řídícího napětí na kanálu A řídící jednotky
u_B	V	okamžitá hodnota řídícího napětí na kanálu B řídící jednotky
u_D	V	statická hodnota blokovací napětí, okamžitá hodnota blokovacího napětí
U_i	V	naindukované napětí
u_k	V	okamžitá hodnota výstupního napětí na komparátoru
u_p	V	okamžitá hodnota pilovitého napětí
U_{ref}	V	referenční napětí
$U_{\tilde{r}}$	V	řídící napětí
u_S	V	okamžitá hodnota synchronizačního napětí
U_V	V	efektivní hodnota napětí na sekundární straně transformátoru

Seznam použitých zkratk:

A/D	Označení analogově – digitálního převodníku
AVR Studio	Vývojové prostředí pro práci s mikroprocesory
BCD	Kód pro převod dekadického čísla do dvojkové soustavy
BVŘU	Blok vyhodnocení řídicího úhlu
CAD	Software sloužící k navrhování
CMOS	Technologie výroby integrovaných obvodů
č/č1, č/č2	Čítač a časovač č. 1, čítač a časovač č. 2
DPS	Deska plošných spojů
Eagle	Editor umožňující navrhovat desky plošných spojů
EPROM	Druh paměti mazatelné pouze UV světlem
F	Filtr
FD	Fázový detektor
FLASH	Druh elektricky mazatelné paměti
G	Řídicí elektroda tyristoru
KO	Komparátor
log.0	logická nula
log.1	logická jedna
MCU	Zkratka slova mikroprocesor
MIPS	Milionů instrukcí za sekundu (měrná jednotka)
RISC	Redukovaný instrukční soubor mikroprocesoru
ŘJ	Řídicí jednotka
TTL	Tranzistorově – tranzistorová logika, technologie výroby integrovaných obvodů
TV1, TV2	Tvarovač č. 1, Tvarovač č. 2
VCO	Napětově řízený oscilátor
ZJ	Zobrazovací jednotka

Obsah:

1	Úvod:	8
2	Vývoj mikroprocesorů a jejich využití v oblasti řízení:	9
2.1	Možnosti číslicového řízení fáze:	9
2.2	Rozsah řízení jednofázového řízeného usměrňovače:	10
2.3	Fázové řízení komparací pilovitého napětí:	11
2.4	Číslicové řízení fáze:	12
2.4.1	Synchronizace za pomoci operačního zesilovače:	13
2.4.2	Synchronizace s využitím PLL:	14
2.5	Časovací obvody:	17
2.6	Možnosti zadávání hodnoty řídicího úhlu α :	18
3	Myšlenka návrhu řídicí jednotky:	20
3.1	Požadavky a podmínky kladené na řídicí jednotku:	20
3.2	Princip činnosti:	21
3.3	Výběr vhodného mikrokontroléru:	22
3.3.1	Čítače a časovače:	22
3.3.2	Externí přerušení:	23
3.3.3	Analogově – digitální převodník (A/D):	23
3.4	Reálné zapojení:	24
3.5	Návrh a realizace:	29
3.6	Způsob řízení tyristorů:	31
4	Řídicí software:	35
4.1	Vykonávání hlavního smyčky programu:	35
4.2	Externí přerušení:	39
4.3	Přerušení od časovačů:	41
4.4	A/D převodník:	45
5	Kontrolní měření a ověření funkce:	46
6	Výpočty pro určení konstant použitých v algoritmu softwaru:	51
7	Závěr:	53
8	Seznam použité literatury:	54
9	Seznam příloh:	56
9.1	Změřené průběhy:	56
9.2	Návrh a realizace řídicí jednotky:	56
9.3	Software:	56

1 Úvod:

Usměrňovače jsou jedním ze základních stavebních kamenů v elektronice. Jejich využití je pokryto v širokém spektru aplikací. Výkonové usměrňovače se používají především v průmyslových aplikacích pro pohony strojů, jako jsou např. válcovací stolice a obráběcí stroje. Zde zejména usměrňovače řízené, neboť usměrňují střídavé napětí na stejnosměrné a zároveň umožňují regulaci pohonů. Dále pak v chemickém průmyslu pro galvanické pokovení, kde se používají velké proudy a zároveň nízké napětí. Taktéž v rozvodnách pro trakční kolejová vozidla (tramvaje, vlaky) můžeme najít usměrňovače, a v neposlední řadě je využito aplikace usměrňovačů i v mnoha spotřebičích pro domácnosti.

Hlavní funkcí usměrňovače je převedení střídavého proudu na stejnosměrný. Jako základní prvek se v usměrňovačích užívají polovodičové diody a tyristory. V dnešní době je snahou tyto nahrazovat moderními součástkami jako je například tranzistor nebo vyšší vývojové formy tyristorů (pro usměrňovače pracující ve střídačovém chodu – tzv. pulsní usměrňovače). Ale vzhledem k tomu, že diody a tyristory umožní přenášet mnohem vyšší propustný proud (až 5kA) a snesou vysoké závěrné napětí (až 7,5kV) na rozdíl od polovodičového tranzistoru, používají se řízené tyristorové usměrňovače dodnes.

Tyristor je součástka, kterou lze pouze sepnout, nikoliv však jednoduše vypnout. K vypnutí je zapotřebí tzv. komutačního obvodu (nucené vypnutí) nebo nechat tyristor vypnout přirozenou cestou poklesem propustného proudu na nulu nebo alespoň na minimální hodnotu určenou katalogovým údajem. Pokles proudu na nulovou hodnotu je zajištěn poklesem amplitudy střídavého napětí (sinusový průběh) ze své maximální hodnoty na nulu. Z tohoto vyplývá jediný možný druh řízení usměrňovačů, a to je fázové řízení. Jedná se o způsob sepnutí tyristoru v daném časovém okamžiku. K tomu jsou určeny obvody, které zajišťují řízení usměrňovačů.

V prvopočátcích se k řízení využívaly jednoduché časovací obvody složené z rezistorů a kondenzátorů (RC členy), případně jejich kombinace s aktivními prvky. Dnes s rozvojem číslicové techniky jsou na výběr zcela jiné možnosti. Na trhu existují zařízení obsahující mikroprocesory a mikropočítače, které dokáží měřit a řídit různé aplikace, vyhodnotit jejich stav a podle toho řízení obvodu přizpůsobit. Řízení je díky tomu přesné a rychlé. Navíc mikroprocesorově řízená jednotka podporuje komunikaci s jinými zařízeními k ní připojenými, jako je například osobní počítač a jiné. Pomocí něj tak snadno provedeme dálkové nastavení parametrů nebo zaznamenáme dlouhodobý průběh měření apod.

V následujících odstavcích bude popsáno provedení řízení pomocí číslicově ovládané řídicí jednotky jednofázového usměrňovače určeného pro laboratorní účely.

2 Vývoj mikroprocesorů a jejich využití v oblasti řízení:

Mikroprocesory měly být v minulosti využívány především v oboru výpočetní techniky, kde by plnily úlohu výpočtu různých funkcí. Postupným vývojem mikroprocesorů se zvyšovala jejich rychlost vykovávání instrukcí a v dnešní době mají mikroprocesory rychlost vykonávání instrukcí až 20MIPS (milionů instrukcí za vteřinu). To umožnilo používat mikroprocesory kromě nenáročných (jednoduchých) výpočetních operací i v oblasti náročné měřicí struktury nebo v oblasti řízení a regulace. Extrémním případem jsou digitální signálové mikroprocesory. Dokáží zpracovat až 60MIPS a využívají se především ke zpracování signálů v oblasti regulace, vyžadující rychlé odezvy a v místech potřeby rychlých výpočetních operací.

První mikroprocesory byly vyvinuty již na počátku 70. – tých let. Jednalo se o mikroprocesory určené především pro oblast výpočetní techniky. Mikroprocesor obsahoval pouze tzv. jádro, které bylo schopno provádět například základní matematické operace a operace posunů a přesunů. Pro další zpracování dat bylo potřeba mikroprocesor vybavit dalšími periferními zařízeními jako paměti, vstupně – výstupní porty, čítače/časovače, atd., aby mohl mikroprocesor pracovat s okolním prostředím a zpracovávat tak i jiná data.

Postupem let se vývoj mikrokontrolérů posunul daleko dopředu. Není vůbec problém sestavit s jeho pomocí téměř vše, na co si vzpomeneme z oblasti číslicové techniky, a to za přijatelnou cenu a minimem použitých součástek. Jen namátkou vyberu několik možných aplikací. Mohou to být například aplikace v průmyslu jako programovatelné automaty, počítačové systémy, použití v automobilovém průmyslu, v měřicí a řídicí technice, v domácnostech a podobně. Toto bylo umožněno díky integraci vestavěných periférií přímo v mikrokontroléru. Běžný mikrokontrolér může disponovat různou sadou hardwarového vybavení. [7] [8]. To se může lišit dle výrobce a každý z nich do svých mikroprocesorů implementuje jinou sadu vybavení.

2.1 Možnosti číslicového řízení fáze:

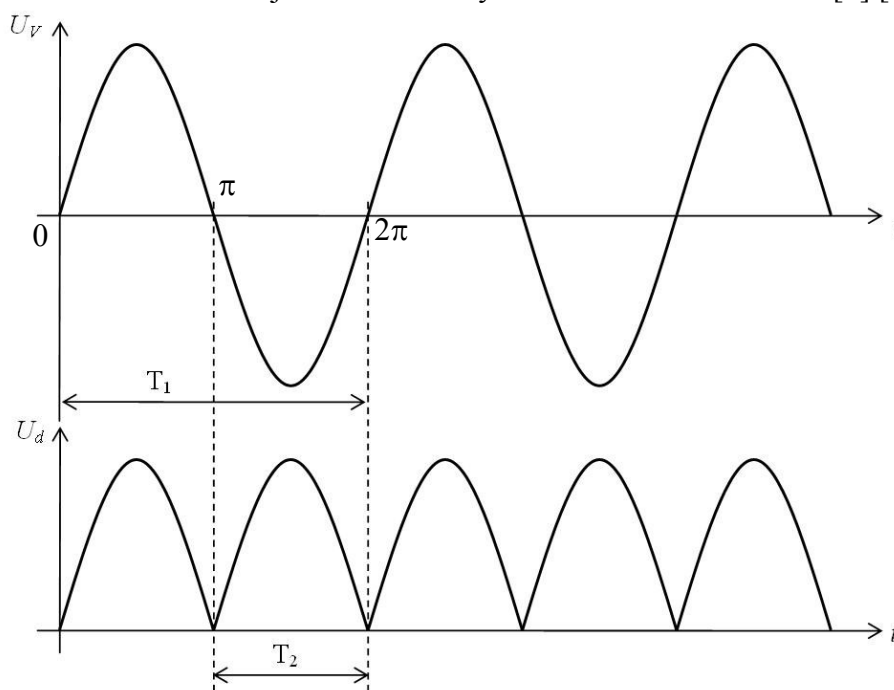
Vysoká rychlost matematických operací, velká přesnost a jednoduchost fyzického zapojení – to vše vedlo k rozvoji číslicových obvodů řízení různých aplikací nejen v průmyslu. Mikroprocesorem řízené řídicí jednotky zcela vytlačily ty konvenční, zastaralé analogové. Hlavním důvodem vytlačování analogových jednotek modernějšími číslicovými je jejich vyšší energetická účinnost. Analogové jednotky bývaly předem nastaveny na určité parametry a dále s nimi už nebylo nikterak manipulováno. Digitální jednoty jsou schopny se přizpůsobit jakémukoliv typu zátěže v širokém rozmezí.

Jak již bylo výše uvedeno, mikroprocesory obsahují různou hardwarovou sadu vybavení, se kterou již lze realizovat obvody pro regulaci a řízení jak v oblasti analogové, tak i digitální. Mikroprocesor dnešního věku obsahuje periferie jako je A/D převodník či analogový komparátor pro styk s analogovým prostředím nebo vstupně – výstupní porty pro styk s digitálním prostředím. Dále může obsahovat různý počet čítačů či časovačů řízených přímo z generátoru hodinových pulsů, určující takt celého mikroprocesoru. To zaručuje vysokou přesnost časování v poměrně velkém rozsahu.

Kromě těchto jmenovaných disponují mikroprocesory standardně rozhraním pro komunikaci s jinými zařízeními (např. SPI, USART), externími přerušeními, pamětmi apod. Díky těmto předpokladům lze mikroprocesory používat pro řízení a automatizaci výrobního procesu.

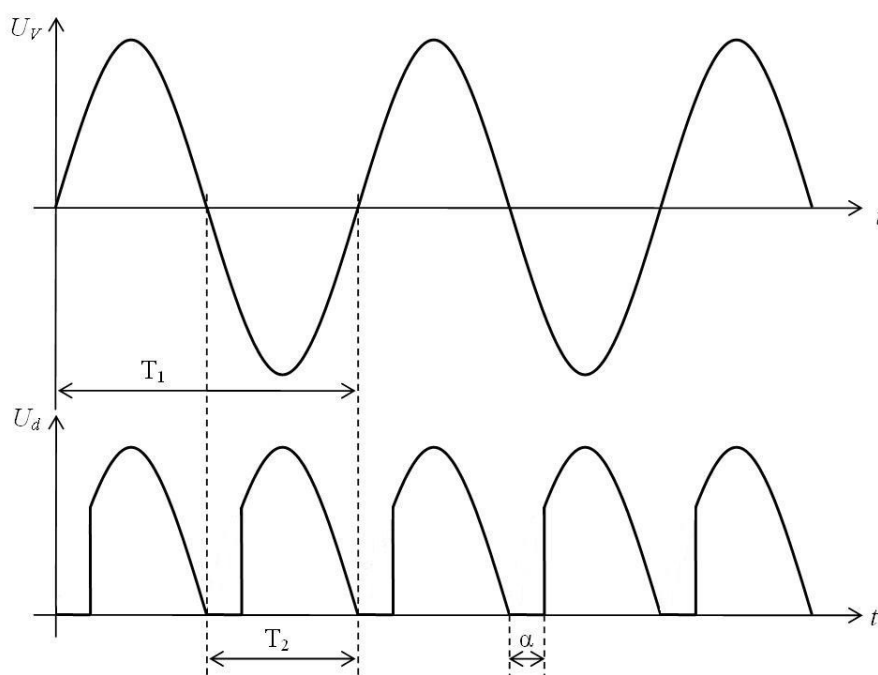
2.2 Rozsah řízení jednofázového řízeného usměrňovače:

Nejdůležitějším parametrem pro řízení usměrňovačů je řídicí úhel, označovaný α . Pomocí něj určujeme jakýsi „bod“ sepnutí (tedy fázi) jednotlivých tyristorů. Fázové řízení by se dalo zjednodušeně vysvětlit jako zapínání tyristorů ve vhodném časovém okamžiku. Rozsah řízení lze provést v celém rozsahu periody usměrněného napětí. Průběh střídavého a usměrněného napětí pro dvoupulsní usměrňovač je zobrazen na obr. 1. Délka periody střídavého napětí je vyjádřena v radiánech od 0 až do 2π (čili od 0° do 360°). Po usměrnění napětí se délka periody zkrátí na polovinu, tj. od 0 do π (0° až 180°), neboť usměrněné napětí nedosahuje záporných hodnot. V tomto rozsahu je možné provádět fázové řízení jednofázového tyristorového usměrňovače. [1] [5]



Obr. 1. Průběh napětí (shora) střídavého (U_v) napětí a usměrněného napětí (U_d)

Vyhodnocení řídicího úhlu se provádí z místa průchodu střídavého napětí nulou. Tento bod určuje počátek řídicího úhlu. Okamžik sepnutí tyristoru je dán z funkce absolutní hodnoty sinus, tedy v rozsahu $0^\circ < \alpha < 180^\circ$. V tomto bodě dochází k sepnutí tyristoru. Pro názornou ukázkou je na obr. 2 zobrazen průběh usměrněného napětí řízeným usměrňovačem, kde je patrný úhel řízení. Pro fázové řízení se používají řídicí obvody jak analogové, tak i digitální. Z počátku se využívaly první analogové obvody sestavené z diskretních součástek jako jsou tranzistory, později je nahradily operační zesilovače. Vznikaly i první číslicové řídicí obvody obsahující logické členy jako hradla a sekvenční obvody. Později se do konstrukcí začleňovaly i mikroprocesory jako řídicí prvky.



Obr. 2. Průběh usměrněného napětí U_d tyristorovým usměrňovačem řízeného řídícím úhlem α

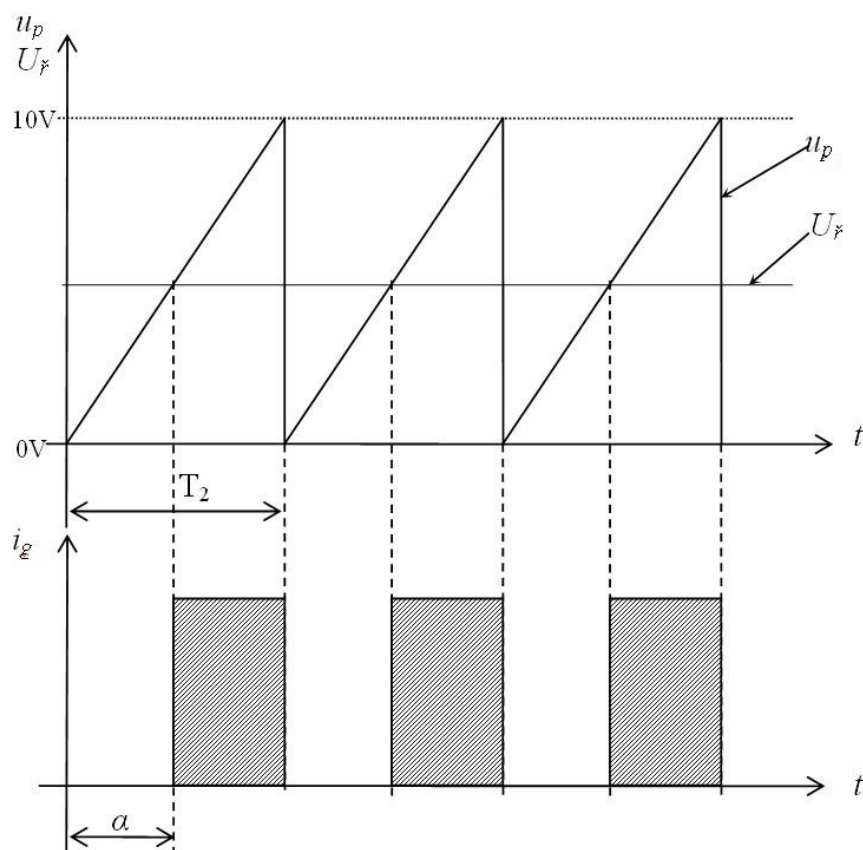
2.3 Fázové řízení komparací pilovitého napětí:

Způsob fázového řízení usměrňovačů komparační metodou byl často využíván v minulých letech. Jednalo se o poměrně přesnou a lineární metodu řízení, proto byly řídicí jednotky začleňovány především do průmyslových aplikací. Urychlení rozvoje řídicích jednotek napomohlo začlenění operačního zesilovače do systému, který konstrukci zjednodušil. Ještě před počátkem začleňování operačních zesilovačů do konstrukcí se řídicí obvody sestavovaly z tranzistorů. Automaty i tak byly dosti rozměrné a vyžadovaly značný příkon. S rostoucím počtem součástek tak kvadraticky klesala spolehlivost a účinnost.

Z počátku přesné regulace tyristorových usměrňovačů se často využívala metoda porovnávání dvou napětí, čili komparační metoda. Ta dala základ dalšímu rozvoji řízení, zejména pak v číslicové oblasti regulace.

Metoda komparace spočívá v porovnávání dvou signálů přiváděných na vstup komparátoru (sestaven přímo z operačního zesilovače nebo diskretních součástek). Nastavení řídicího úhlu α bylo možno provádět pouze analogovým signálem, a to napětím v rozmezí od 0V do 10V. Řídicí jednotku tvoří generátor nesymetrického pilovitého napětí u_p , které je synchronizováno ze sítě. Na výstupu generátoru se objevuje lineárně narůstající napětí o hodnotách od 0V až po maximálních 10V. Napěťové úrovně jsou odvozené od maximálních napěťových hladin, které jsou schopny dodat operační zesilovače při symetrickém napájení obvyklých 15V. Strmost nárůstu pilovitého napětí je dána délkou periody. V našem případě by napěťové úrovně 10V mělo být dosaženo po 10ms. To je dáno délkou půlvlny síťového střídavého napětí o frekvenci 50Hz. Porovnáváním pilovitého napětí u_p s napěťovou úrovní řídicího napětí U_f (pohybuje se také v úrovních 0V až 10V) se dá plynule nastavit hodnota v celém rozsahu řídicího úhlu α od 0° až po 180° . Průběhy napětí z generátoru

nesymetrické pily u_p , referenčního napětí $U_{\check{r}}$ a výstupního napětí řídicí jednotky je zobrazen na obr. 3.



Obr. 3. Princip komparace pilovitého napětí u_p a řídicího napětí $U_{\check{r}}$

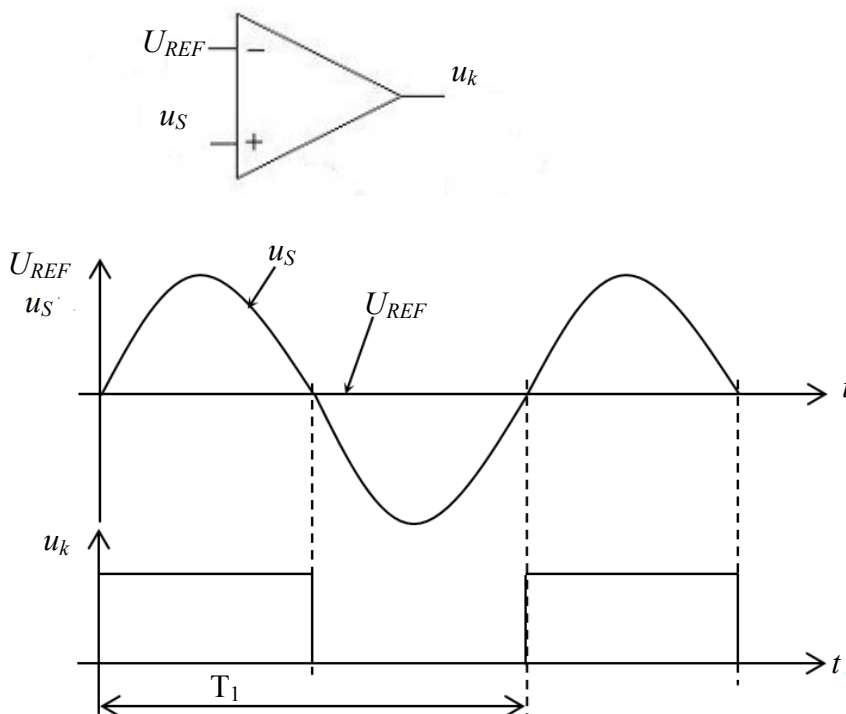
2.4 Číslicové řízení fáze:

Číslicové řídicí obvody se od analogových liší způsobem zadávání požadovaných parametrů. To se provádí digitálně za pomoci informace zakódované v binárním čísle. Není zapotřebí analogových signálů. Způsob řízení a vyhodnocení řídicího úhlu α může být podobný jako výše uvedený (viz komparační metoda). Aby mohl číslicový obvod správně vyhodnotit řídicí úhel a provést následné zapálení tyristoru, musí mít informaci o okamžité hodnotě střídavého napětí. To získáme ze střídavého napětí napájecí sítě. Z něj pak získáme synchronizační impulsy, z kterých řídicí jednotka vyhodnotí vhodnou dobu zapálení tyristoru. Synchronizační impulsy můžeme získat dvojím způsobem. První z nich vyžaduje začlenit do struktury komparátor složený například z operačního zesilovače. Tento způsob je však primitivní a pro průmyslové aplikace nevhodný. Druhý, promyšlenější způsob, vyžaduje k vyhodnocení průchodu synchronizačního signálu nulou využít vlastnosti obvodu fázového závěsu (PLL), sloužící jako filtr zvlnění s vynikajícími vlastnostmi. Problematika obou řízení bude vysvětlena níže.

2.4.1 Synchronizace za pomoci operačního zesilovače:

Protože řízení usměrňovače obstarává samotný mikroprocesor, nelze tedy přivést střídavé napětí přímo na něj, neboť mikroprocesor umí pracovat pouze s digitálními čísly. Je zde nutno použít mezistupeň pro převod analogové hodnoty na digitální číslo. K tomuto účelu jsou určeny A/D převodníky. Převedené číslo je tak přivedeno na jeden ze vstupních portů a následně dále zpracováno. Nevýhodou však je, že průchod nulou střídavého napětí vyhodnocují složité algoritmy, které vyžadují spoustu času (využijí hodně strojových cyklů), a tím dojde k fázovému posuvu a určení nulového napětí (tedy počátku) s určitým zpožděním. Navíc samotný A/D převodník pracuje s dosti nízkou vzorkovací frekvencí (běžně dostupné – aproximační – mají vzorkovací frekvenci okolo 100kHz), což by vneslo do určení doby vygenerování řídicího impulsu další chybu. Lze je tedy použít jen pro signály s pomalou změnou hodnoty napětí nebo s neměnnou (stálou) napěťovou úrovní.

Jiný způsob vyhodnocení průchodu střídavého napětí nulou je za pomoci jednoduchého detektoru, jenž vyhodnocuje skutečně jen průchod nulou. Nepotřebuje znát žádnou okamžitou napěťovou úroveň, což algoritmus výpočtu mikroprocesoru zjednoduší. Mikroprocesor tak nespotřebuje velké množství strojových cyklů a přesnost určení nulové hodnoty střídavého napětí se výrazně zvýší. K těmto účelům postačí jednoduchý komparátor složený z operačního zesilovače. Ten porovnává dvě napěťové úrovně (napětí referenční U_{REF} a napětí střídavé synchronizační u_S). Komparátor porovná obě napětí a pokud dojde ke změně napětí ($u_S > U_{REF}$ nebo $u_S < U_{REF}$), dojde k překlopení komparátoru. Napětí stačí přivést přímo na vstup mikroprocesoru a vyhodnotit okamžik sepnutí tyristoru. Princip funkce je vysvětlen na obr. 4.



Obr. 4. Průběh napětí synchronizačního střídavého signálu u_S a referenčního napětí U_{REF} a napětí po komparaci obou signálů u_k

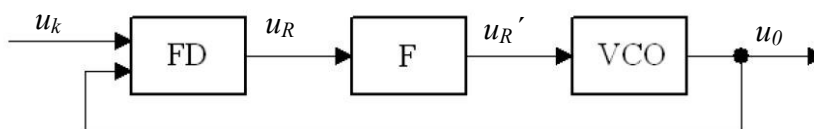
V moderních strukturách mikroprocesorů jsou implementovány A/D převodníky přímo na čipu, což výrazně usnadní návrh konstrukce. Například firma *Atmel*, jejichž mikroprocesor jsem ve svém návrhu jednotky použil, vyrábí mikroprocesory se strukturou typu *RISC*, které jsou poměrně dobře cenově přijatelné a navíc obsahují velké množství hardwarového vybavení. Díky tomu si je mnoho konstruktérů oblíbilo. Struktura mikroprocesoru *Atmel* obsahuje navíc kromě A/D převodníku také analogový komparátor, který lze použít právě pro aplikace jednoduchého porovnávání napětí. Je jen velká škoda, že nedokáže porovnávat i záporná napětí. Napětíové úrovně umí porovnat jen v kladných hodnotách. Je tedy nutné signál pře přivedením na vstup mikroprocesoru řádně upravit, jinak by mohlo dojít k destrukci mikroprocesoru.

Velkou nevýhodou řízení je však velká citlivost vstupních obvodů. Mikroprocesor není připojen přímo na zdroj střídavého napětí, ale přes vlastní napájecí zdroj, a pro jeho správnou funkci je nutno přivést na jeho vstup informaci o aktuální hodnotě střídavého napětí, a to není jednoduché. Přímé spojení detektoru se zdrojem (jen pomocí např. omezovače) není vhodné. Zdroj napájející usměrňovač může mít vysokou impedanci, která zapříčiní při sepnutí jednoho tyristoru v usměrňovači prudký napětíový pokles (např. při řízení jasu žárovky, kdy studená žárovka má odpor pouze několik jednotek ohmů, ale po zahřátí její odpor stoupne až na stovky ohmů), který může mít za následek „falešný průchod nulou“ a spustí tak znovu časovač (viz dále).

Jevu „falešného průchodu nulou“ se můžeme vyhnout dvojím způsobem. Prvním z nich je použití napájecího transformátoru s velmi malou výstupní impedancí, což nemůže být splněno ve výkonových aplikacích. Takovéto transformátory jsou však rozměrné a ke koupi za poměrně vysokou cenu. Druhou variantou je předřazení vhodného typu filtru před vstupní obvod. Mohou to být různé typy horních zádrží, které krátké napětíové špičky zadrží a vyfiltrují. Nevýhodou však je velký fázový posuv při naladění filtru na síťovou frekvenci $f = 50\text{Hz}$. Krátkých napětíových špiček vyvolaných rušením bychom se sice zbavili, ale fázový posuv φ synchronizačního signálu by v tomto případě byl 45° . Pro účely přesného číslicového řízení je to zcela nevhodné. Lepší je na vstup připojit kombinace dvou a více filtrů. Například spojením filtru horní a dolní prousti vznikne Wienův článek. Ten má po naladění na rezonanční frekvenci fázový posuv φ roven nule. Wienův článek je pro naše účely dostačující a bylo s ním dosaženo dobrých výsledků (viz dále). Extrémním případem v průmyslových aplikacích řídicích jednotek usměrňovačů je předřazení PLL (fázového závěsu). Jeho přítomnost v obvodu zaručuje nulový fázový posuv synchronizačního signálu.

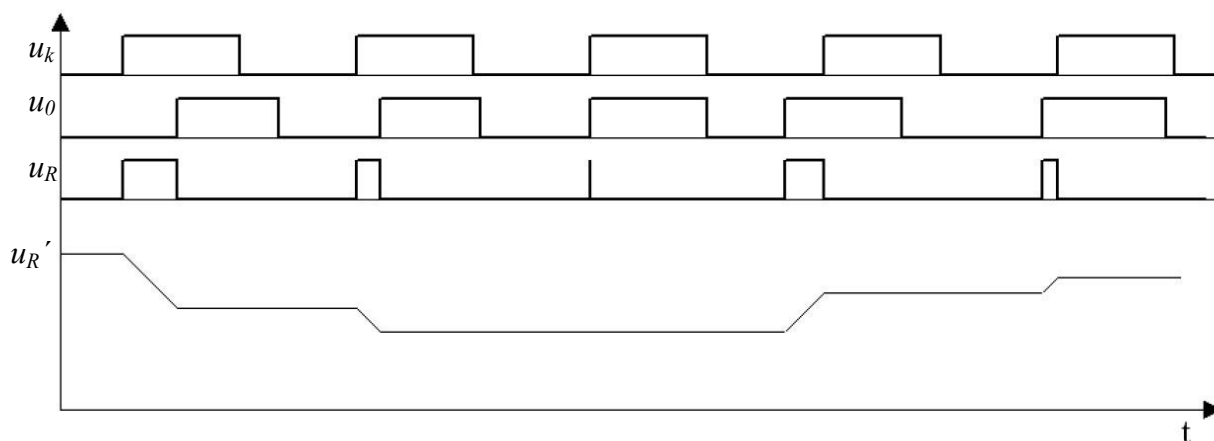
2.4.2 Synchronizace s využitím PLL:

Další možností synchronizace řídicího obvodu se sítí je pomocí fázového závěsu. Ten lze použít jako filtr a zároveň generátor synchronizačních impulsů. Abychom mohli pochopit problematiku fázového závěsu, je na obr. 5 jeho základní blokové schéma.



Obrázek 5. Zjednodušené blokové schéma fázového závěsu

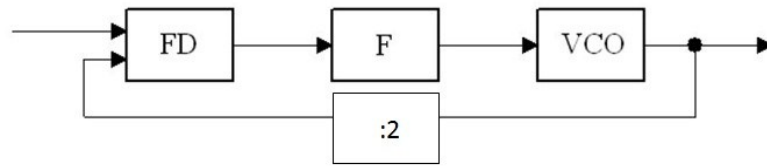
Skládá se z fázového detektoru (FD), porovnávající dva signály. Jeden přichází na svorku u_k , druhý vstup fázového detektoru je svázán s výstupem fázového závěsu. Fázový detektor generuje obdélníkový signál, jehož šířka pulsu je závislá na fázi obou signálů. Průběhy napětí jsou zobrazeny na obr. 6. Obdélníkový signál je dále přiváděn do bloku filtru (F). Ten může být sestaven z RC členu zapojeného jako integrační článek (dolní propust). Jeho úkolem je převést obdélníkové napětí na napětí stejnosměrné (vyhlazené). Usměrněné napětí se dále posílá do bloku napětím řízeného oscilátoru (VCO). Ten na výstupu zvyšuje nebo snižuje frekvenci f podle velikosti přiváděného napětí na jeho vstup.



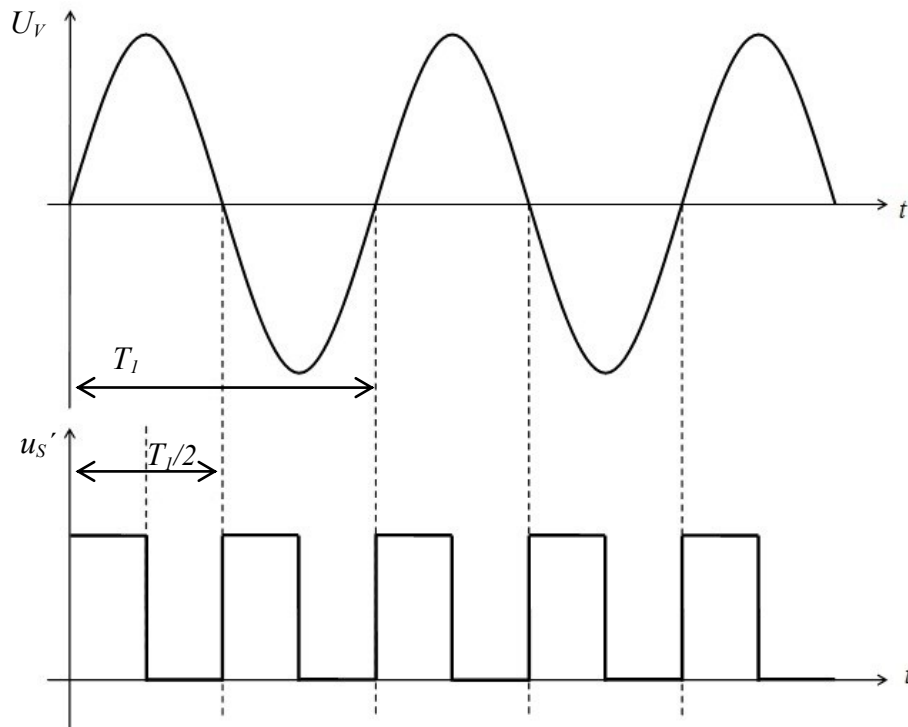
Obrázek 6. Průběhy napětí fázového detektoru na vyznačených bodech z obr. 5

Fázový detektor hlídá fázi signálu na vstupní svorce u_k a na výstupní svorce napětím řízeného oscilátoru. Dojde – li ke zvýšení nebo snížení přiváděné frekvence, fázový detektor opět doladí oscilátor tak, aby výstupní signál byl ve fázi se vstupním. Toto však funguje jen v určité míře, protože fázový závěs lze provozovat v určité šířce frekvenčního pásma. Pro jiné pásmo se musí doladit filtr. Na krátké změny vstupního signálu (krátké impulsy nebo nasuperponované vysokofrekvenční rušení) fázový závěs nereaguje, pracuje zároveň jako filtr.

Vložením děličky do zpětné vazby mezi napěťovým oscilátorem a fázovým detektorem získáme „frekvenční násobičku“. Na výstupu fázového závěsu se objeví signál s dvojnásobnou frekvencí. To lze s výhodou použít pro synchronizaci řídicích obvodů pro tyristorové usměrňovače. Síťová frekvence je vynásobena dvěma (tedy z původních 50Hz na 100Hz). Na výstupu vzniká signál s obdélníkovým průběhem. Tento dále využíváme k synchronizaci řídicí jednotky se sítí. Jak již bylo zmíněno, spínání tyristorů vytváří na síťovém napětí prudké poklesy napětí („zuby“), které mohou zapříčinit znemožnění funkce řídicí jednotky. Fázový závěs tyto špičky dokáže odfiltrovat. Obdélníkový signál se poté posílá k dalšímu zpracování do řídicího obvodu.

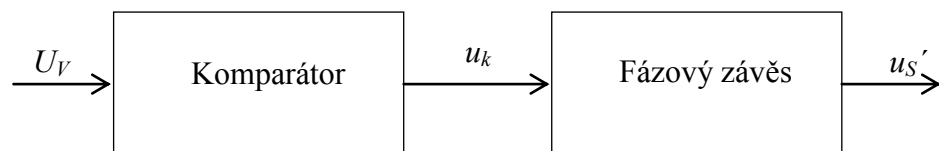


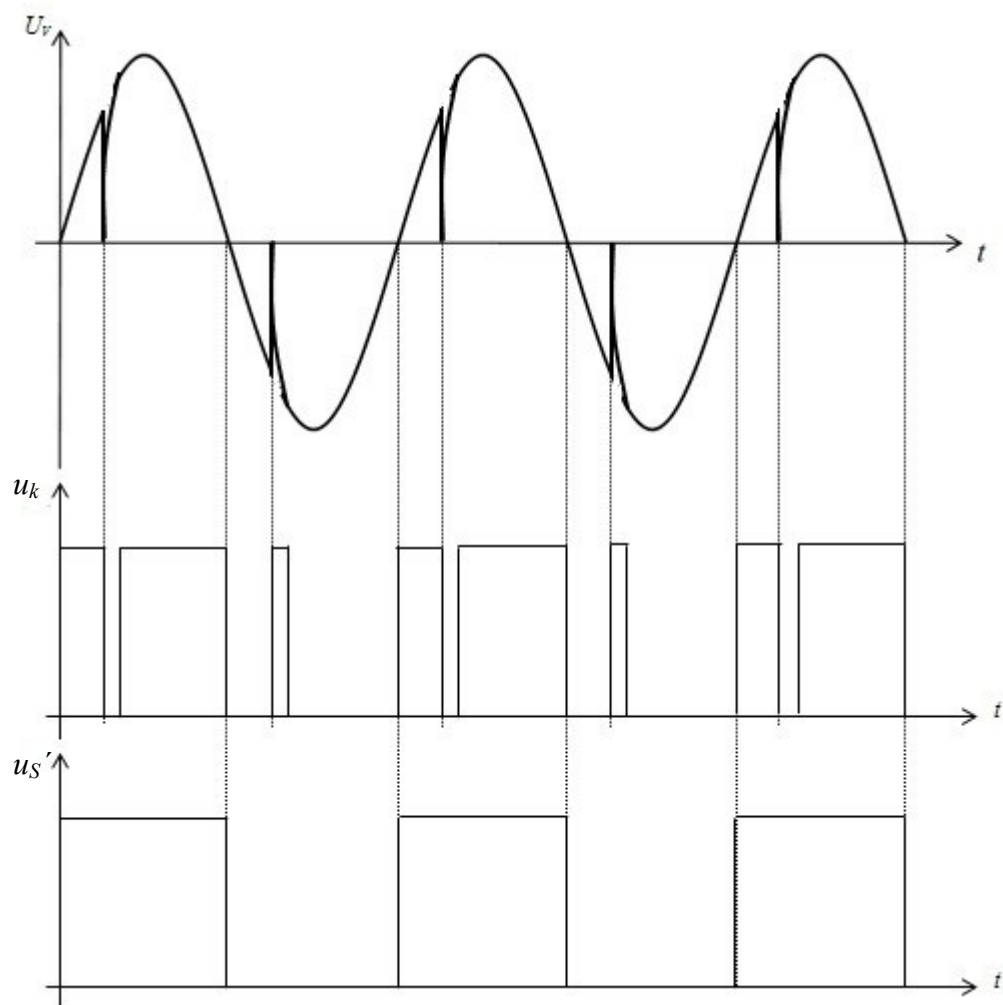
Obr. 7. Blokové schéma zapojení fázového závěsu jako zdvojovače frekvence



Obr. 8. Průběhy napětí na vstupu a výstupu fázového závěsu zapojeného jako násobička frekvence

Jako fázový závěs lze použít známý obvod 4046. Jedná se o číslicový obvod, který lze začlenit za komparátor (tzn. až po úpravě spojitého analogového signálu na obdélníkový dvouhodnotový průběh). Zde poté pracuje jako filtr odolný proti rušení spínání tyristorů.





Obr. 9. Průběh síťového napětí U_V rušeného spínáním tyristorů, průběh napětí u_k z detektoru průchodu nulou a napětí u_S' vystupující z fázového detektoru

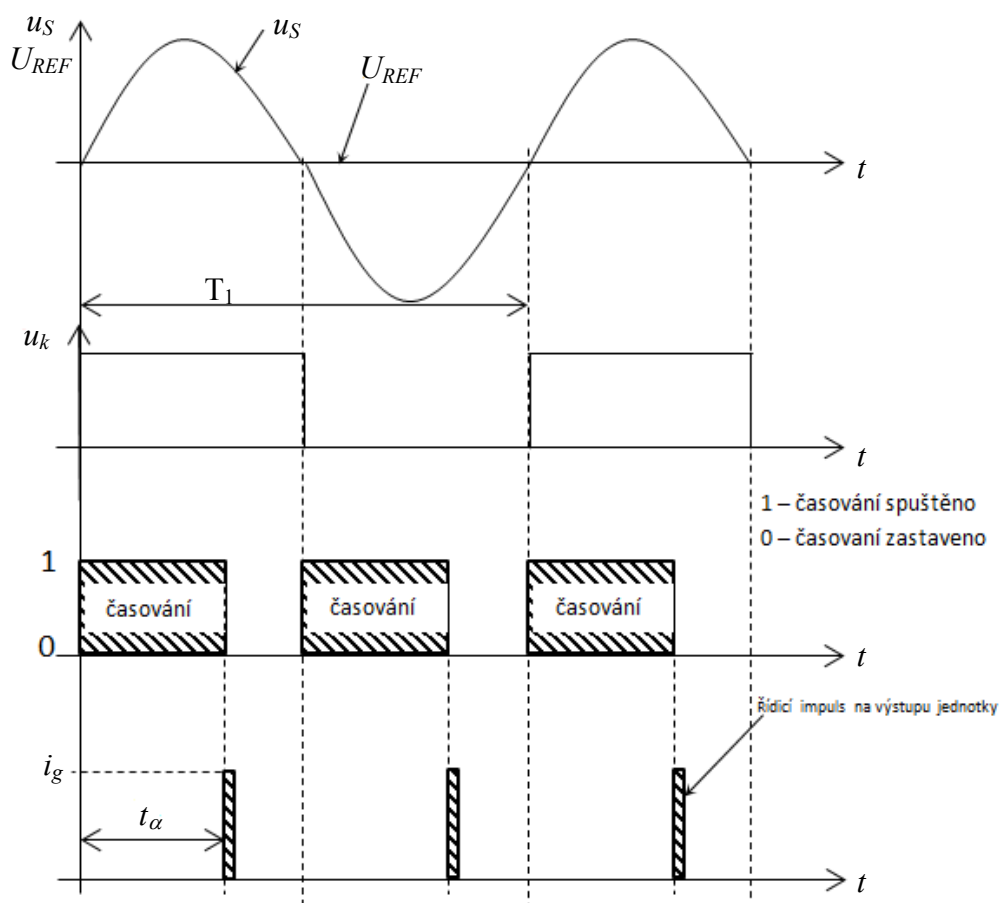
2.5 Časovací obvody:

V dřívějších dobách byly řídicí obvody fázového řízení tyristorů složeny z jednoduchých RC členů. Později se do struktur začleňovaly aktivní prvky pro získání lepších parametrů obvodu a poslední stupeň ve vývoji analogového řízení se vyráběly specializované integrované obvody určené pro fázové řízení.

Ve strukturách mikroprocesoru je implementováno několik přesných časovačů, řízených hodinovým krystalem samotného mikroprocesoru. Frekvence inkrementace časovače může dosahovat až 20MHz (podle konkrétního typu mikroprocesoru). Časovače lze provozovat v různých módech časování od několika stovek nanosekund a výše. Pomocí těchto časovačů můžeme realizovat fázové řízení tyristorů. Díky vysoké frekvenci je zaručena přesnost časování. Chyba nastavení řídicího úhlu α tak dosahuje sotva $0,1^\circ$.

Jak bylo zmíněno výše, pro průchod signálu nulovou hodnotou vygeneruje detektor průchodu nulou náběžnou hranu, na kterou mikroprocesor zareaguje a spustí jeden

z časovačů. Do časovače (konkrétně do komparačního registru) se vloží konstanta, která je určena velikostí řídicího úhlu. Časovač počítá do určité hodnoty a po jejím dosažení se na výstupu mikroprocesoru vygeneruje řídicí impuls, potřebný pro zapálení tyristoru. Tvar řídicího impulsu je individuální a záleží na konkrétní aplikaci. S převahou se řízení provádí impulsem o délce přibližně 100 μ s. Tuto podmínku jsem použil i ve svém návrhu jednotky. Časový diagram vytváření řídicích impulsů je zobrazen na obr. 10.



Obr. 10. Časový diagram určení fázového řízení číslicové řídicí jednotky

Časovací obvody mikroprocesoru lze nastavit i na režim čítání. Lze tak změřit délku trvání periody a přizpůsobit tak řídicí jednotku pro jiné frekvence, než jen síťových 50Hz. Jednotka může být využívána v soustavách s vyšší nebo nižší frekvencí. Jediným omezovacím faktorem je spínací frekvence tyristorů, která by neměla překročit 400Hz (kvůli velkým výkonovým ztrátám).

2.6 Možnosti zadávání hodnoty řídicího úhlu α :

Fázové řízené obvodů je možné pouze tehdy, je-li známa velikost řídicího úhlu α . Lze ji zadat několika způsoby jak digitálně, tak i analogově.

Některé zastaralejší principy zadávání řídicího úhlu se stále ještě užívají. Hlavním představitelem je zadávání řídicího úhlu α pomocí analogového signálu

(stejnosměrného napětí). Mikroprocesory stejnosměrné analogové napětí zpracovat neumějí. Proto se stejnosměrné (analogové) napětí převede na digitální číslo konvertorem. Jedná se A/D převodník. Jak již bylo zmíněno výše, A/D převodníky se nehodí pro měření rychlých změn (výjimkou jsou DSP), ale pro sledování pomalých signálů, jako je právě ten řídicí. Řídicí jednotky zpravidla bývají vybaveny právě tímto vstupem pro analogové řízení. Mohou se tak snadno začlenit do systémů se staršími regulačními obvody.

Co je však častější, je zadávání řídicího úhlu v číslicové podobě přímo do mikroprocesoru. To dovoluje připojit řídicí jednotky do obvodů řízeným např. osobním počítačem, kde lze dálkově zadávat hodnotu řídicího úhlu nebo dlouhodobě ukládat informace o stavu řízeného obvodu a hodnoty ukládat pro další použití. Mikroprocesor je i pro tyto účely vybaven sběrnicemi SPI případně USART pro komunikaci jednotky s jinými zařízeními po průmyslové sběrnici RSxxx.

Další možností je zadávání řídicího úhlu přímo na ovládacím panelu řídicí jednotky bez použití řídicích napětí ze zdrojů dalších regulátorů a počítačů. Tato možnost je výhodná pro aplikace, kde není potřeba regulace jiným zařízením.

Podobného principu fázového řízení usměrňovačů jsem použil i u svého návrhu řídicí jednotky jednofázového tyristorového usměrňovače. Protože se jedná o jednoduchou řídicí jednotku určenou především pro laboratorní účely, nebyla potřeba ji vybavovat všemi zmíněnými periferiemi - například pro komunikaci s osobním počítačem a obvody pro měření. Jednotka však obsahuje základní vybavení pro analogové řízení pomocí řídicího napětí a interního ovládání.

3 Myšlenka návrhu řídicí jednotky:

Cílem sestavení této řídicí jednotky byla myšlenka vytvoření co nejjednoduššího zapojení s širokým rozsahem využití jejích vlastností. Zároveň jsem požadoval, aby úkony týkající se řízení, byly soustředěny pouze do mikroprocesoru. Vznikla konstrukce, která je výsledkem těchto požadavků. Navržená konstrukce je externí řídicí jednotka, kterou lze připojit k bloku tyristorového usměrňovače. Konstrukce je navržena do plastového boxu jako samostatná řídicí jednotka obsahující vlastní zdroj napájení a schopná samostatné funkce. Ovládání je provedeno dvojím způsobem. První způsob je řízení interní, kdy řídicí jednotku ovládáme přímo pomocí tlačítek. Řídicí úhel tedy může nastavit obsluha přímo v řídicí jednotce a nevyžaduje další zařízení. Druhým způsobem je řízení externí. Pro nastavení řídicího úhlu se musí na vstup přivést analogový signál, kterým nastavíme požadovanou hodnotu úhlu. Napětí lze získat z regulovatelného zdroje či například z regulátoru, k němuž je jednotka připojena. Hodnota aktuálního řídicího úhlu se odečítá z displeje. Pro potřebu rychlého vypnutí zátěže a zablokování je jednotka vybavena vypínačem, který zablokuje přivádění řídicích impulsů na tyristorový usměrňovač. Pro přesné fázové řízení je potřeba na řídicí jednotku přivést tzv. synchronizační signál, sloužící k určení počátečního bodu, ze kterého jednotka vyhodnotí řídicí úhel (dobu sepnutí).

3.1 Požadavky a podmínky kladené na řídicí jednotku:

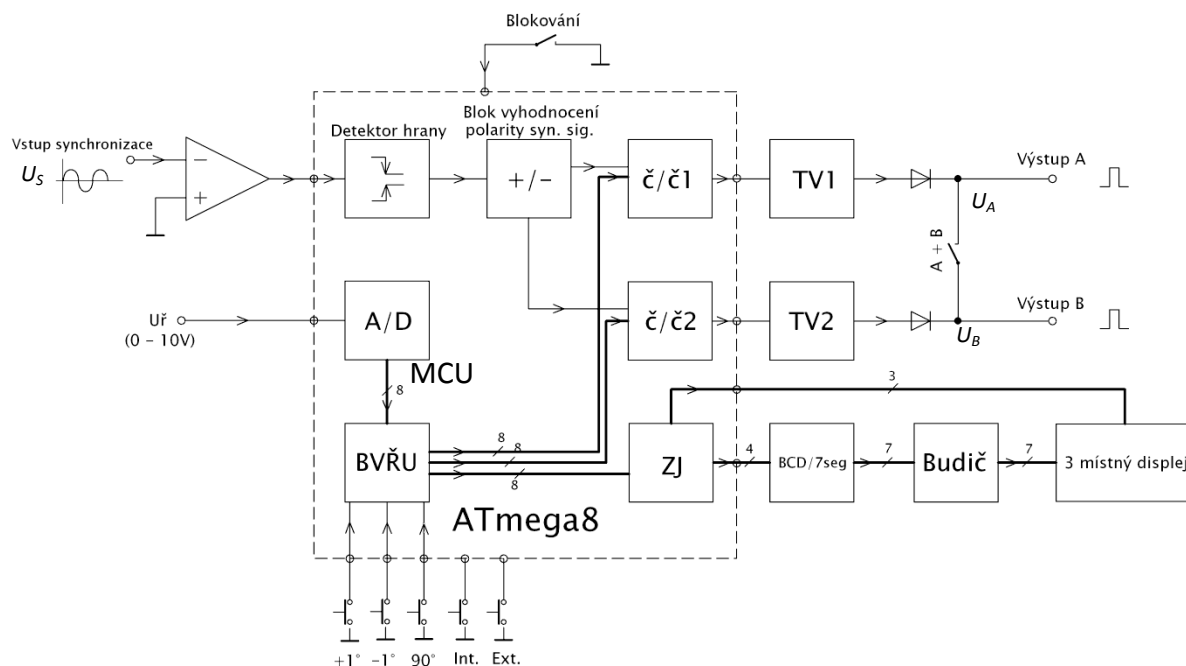
Řídicí jednotka je navržena pro distribuční síť s frekvencí $f = 50\text{Hz}$. Nepředpokládá se, že jednotka bude používána v jiných typech sítí s rozdílnou frekvencí. Synchronizační signál tedy musí mít f pouze 50Hz. Jiná frekvence než jmenovitá způsobí chybu řízení, ale neznemožní její funkci. Nastavený řídicí úhel pak nebude odpovídat skutečnému řídicímu úhlu. Požadovaná minimální amplituda synchronizačního napětí se pohybuje už od několika desítek milivoltů, ale vlivem poměrně velkého elektromagnetického rušení vyvolaného především špičkovým proudem tyristorů v usměrňovači je vhodné uvažovat s minimální hodnotu synchronizačního napětí až od 1V. Při této amplitudě se rušení neprojevuje. Nízká úroveň synchronizačního signálu umožňuje na synchronizační vstup připojit i jiné zařízení, jako je generátor synchronizačních impulsů, popřípadě i izolační zesilovač nebo jiný zdroj synchronizace. Maximální amplituda synchronizačního napětí může dosahovat až 100V. Z bezpečnostních důvodů je toto nejvyšší hranice napětí, nicméně na vstup lze přivést napětí vyšší než 100V. Vzhledem k širokému rozsahu amplitudy synchronizačního signálu může být jako zdroj synchronizačního signálu použit jakýkoliv zdroj nebo transformátor. Jediným omezením synchronizace je pouze frekvence. Tvar signálu může být libovolný. Řídicí jednotka zpracuje tvary signálu jako je klasická sinusovka, trojúhelník, lichoběžník nebo obdélník.

Externí řízení vyžaduje zdroj stejnosměrného napětí pohybující se ve standardních úrovních určené pro analogové řízení, tj. 0V až 10V. V případě přepětí řízeného napětíového zdroje nebo mylném zapojení (například obrácení polarity) se smí přivést i vyšší napětí nebo záporné napětí. Jednotka je proti těmto případům chráněna.

Na vstup pro vnější řízení blokování nejsou kladeny žádné zvláštní nároky. K vývodům stačí připojit mechanický spínač. Jinak je možno přivádět řídicí signály o úrovních TTL, kde logická

Dalším z hlavních požadavků na řídicí jednotku je schopnost bezpečně a spolehlivě řídit tyristorový usměrňovač. Jak již bylo v úvodní části zmíněno, tyristor lze spustit několika způsoby. Navrhovaná řídicí jednotka vytváří impulsy obdélníkového tvaru o délce trvání 100μs a amplitudě impulsu 5V, tedy v úrovních TTL. Toto je výhodné, neboť impuls lze snadno upravit dle potřeby běžnými logickými členy (například impuls zkrátit či prodloužit). Jednotka nedokáže ovládat tyristorový usměrňovač přímo, pouze vytváří impulsy, které ovládají koncový (budicí) stupeň s tyristory.

V těchto odstavcích bude na funkčním modelu řídicí jednotky vysvětlen princip činnosti číslicově ovládané řídicí jednotky určené pro tyristorové usměrňovače. Blokové schéma principiálního zapojení řídicí jednotky je uvedeno na obr. 11. Srdcem celé řídicí jednotky je standardní osmibitový mikroprocesor od firmy *Atmel*. Veškeré řízení a ovládání je soustředěno právě v něm. [9]



Princip funkce řídicí jednotky je následující. Synchronizační signál přivádíme na vstup komparátoru (označení KO), jehož funkcí je kontrola průchodů synchronizačního signálu nulovou hodnotou napětí. Při průchodu z kladné hodnoty napětí do záporné nebo ze záporné do kladné hodnoty napětí dojde k překlopení komparátoru. Upravený (obdélníkový) signál je dále veden na vstup mikroprocesoru (MCU), který vyhodnotí, zda se jedná o náběžnou či sestupnou hranu signálu a podle toho spustí čítač 1 nebo 2. (Příčina tohoto děje bude vysvětlena viz níže). Po dovršení určité hodnoty v čítači 1 nebo 2 dojde k vygenerování řídicího impulsu na výstupu mikroprocesoru. Řídicí impuls je přiveden na tvarovač (TV1 a TV2 – podle tvaru hrany), který

tvoří dvojice hradel typu NAND. Z tvarovačů je výstupní zapalovací impuls vyveden na výstupní svorku (*výstup A* a *výstup B*). Způsob ovládání tyristorů je tedy řízen časovačem. Velikostí řídicího úhlu dojde k natavení komparační hodnoty v časovači a po jejím dovršení se na výstupu jednotky vytvoří impuls.

Ovládání jednotky je dvojího typu. Kvůli požadavkům na práci v laboratoři je řídicí jednotka vybavena vstupem pro analogové externí řízení. To se provádí změnou napětí v rozmezí od 0V až po 10V. Napěťová úroveň 10V odpovídá „plně otevřenému usměrňovači“ a úhel řízení je roven 0° a nulové úrovni řídicího napětí odpovídá plný úhel řízení 180° . Řídicí napětí je poté přivedeno na vstup analogově digitálního převodníku (A/D), který převede signál na osmi bitové číslo. Tato hodnota dále vstupuje do bloku vyhodnocení řídicího úhlu (BVŘU). V tomto bloku se také provádí interní nastavování řídicího úhlu pomocí trojice tlačítek zvyšující nebo snižující řídicí úhel. Třetí tlačítko je doplňkové pro nastavení řídicího úhlu α na 90° . Jednotka také obsahuje spínač pro okamžité zablokování jednotky pro případ nouze nebo případné přepojení zátěže za jinou. Ten přivádí signál blokování do mikroprocesoru a softwarově se zajistí blokování řídicích impulsů. Protože blokování řízení programově, není tento způsob vhodný jako bezpečnostní spínač (tzv. „total stop“).

Po zpracování hodnoty řídicího úhlu je číslo dále posíláno do obou časovačů (časovač 1 a časovač 2) a zároveň do bloku zobrazení (ZJ). Tady je aktuální hodnota úhlu rozdělena pomocí algoritmu na jednotky, desítky a stovky a následně posílána na jednotlivé číslice displeje. Zobrazování je provedeno systémem multiplex, kdy jsou postupně zobrazena všechna čísla. Vzhledem k omezenému množství výstupních pinů a portů mikroprocesoru se čísla zobrazovaná na displeji získávají v podobě BCD kódu. Na výstupní port mikroprocesoru je tedy připojen dekodér BCD na sedmi segmentový displej (tato varianta je cenově mnohem přijatelnější, než využití mikroprocesoru s jedním portem navíc). Výstup BCD dekodéru je posílen budičem - umožňuje zvýšit proud displejem. To je zapotřebí kvůli multiplexnímu řízení, kdy je potřeba displejem zvýšit proud, abychom zachovali intenzitu jasu.

3.3 Výběr vhodného mikrokontroléru:

Pro návrh řídicí jednotky pro tyristorové usměrňovače jsem využil vlastností mikrokontroléru *ATmega8* od firmy *Atmel*, který je určitým kompromisem mezi cenou, hardwarovou výbavou a výpočetním výkonem. V následujících odstavcích popíšu funkce nejdůležitějších periférií zmiňovaného mikrokontroléru pro pochopení funkčnosti jednotlivých bloků a princip číslicového řízení řízených usměrňovačů. [9]

3.3.1 Čítače a časovače:

Pro správnou funkci všech časovačů je důležité nastavit příslušné registry speciálních funkcí, aby byl zajištěn jejich správný chod. Popisování nastavení zde nebudu uvádět. Je uvedeno v datasheetu příslušného mikrokontroléru. [9]

• Čítač/časovač 0:

Časovač s označením 0 je použit pro multiplexní zobrazování číslic na displeji. Pomocí vhodného algoritmu je hodnota řídicího úhlu α pohybující se v rozmezí 0° až 180° rozdělena na jednotky, desítky a stovky, a poté uložena do tří samostatných pracovních registrů. Časovač je nastaven tak, aby po jeho naplnění do maximální hodnoty (tj. číslo 255) došlo k přerušení a vypsání jedné cifry (jednotky) na displeji. Časovač se poté vynuluje a opět počítá do svého vrcholu, kdy dojde k přerušení a vypsání desítek na displeji. Cyklus se poté opakuje ještě pro stovky. Po vypsání celého čísla na displeji se znova začínají vypisovat jednotky.

• Čítač/časovač 1:

Časovač 1 se používá pro fázové řízení. Jeho funkce je následující. V komparačním registru časovače (po napočítání hodnoty časovače rovné hodnotě komparačního registru dojde k naprogramované události) se nachází pevně zadaná hodnota trvání jednoho stupně řídicího úhlu α , vztaženého k předpokládané síťové frekvenci 50Hz (synchronizační signál – viz níže). Po spuštění časovače vnějším komparátorem dojde k takovému počtu cyklů časování, jaký je nastavený aktuální řídicí úhel α (např. je nastaven úhel 160° , dojde tedy ke 160 cyklům časování apod.). Po dokončení cyklů časování se na výstupu mikrokontroléru objeví zapalovací impuls určený pro tyristory.

• Čítač/časovač 2:

Jeho funkce je obdobná jako v předchozím případě u čítače/časovače 1, jenom s tím rozdílem, že časovač 2 se spouští při opačné polaritě synchronizačního signálu než čítač/časovač 1.

3.3.2 Externí přerušení:

Vstup externího přerušení je připojen na výstup komparátoru složeného z operačního zesilovače. Ten vytváří obdélníkový průběh ze synchronizačního napětí a řadič externího přerušení vyhodnocuje, zda se jedná o náběžnou nebo sestupnou hranu (tedy jaká je polarita synchronizačního signálu). Podle toho pak spustí čítač/ časovač 1 nebo čítač/časovač 2. Toto rozdělení obou časovačů je provedeno z prostého důvodu. Protože při použití jednoho časovače a vysokých úhlech řízení (asi okolo 177° a výše) by se stala kolize, kdy časovač vytváří řídicí impuls (časuje jeho délku trvání) a zároveň by přicházel pokyn od externího přerušení spuštění nového čítání řídicího úhlu. Obě dvě situace současně jeden časovač nemůže vykonávat. Rozdělením čítačů na spouštění podle polarity je vhodnější, neboť k žádné kolizi nedochází.

3.3.3 Analogově – digitální převodník (A/D):

A/D převodník se do procesu „hlídání“ průchodu synchronizačního signálu nulou nezapojuje, protože je pomalý a nastávala by tak poměrně velká chyba řízení. A/D převodník proto dostal úlohu převodu řídicího napětí (analogové ovládání) na digitální číslo, ze kterého se později získá hodnota řídicího úhlu. A/D převodník je deseti bitový, ale používá se jako osmi

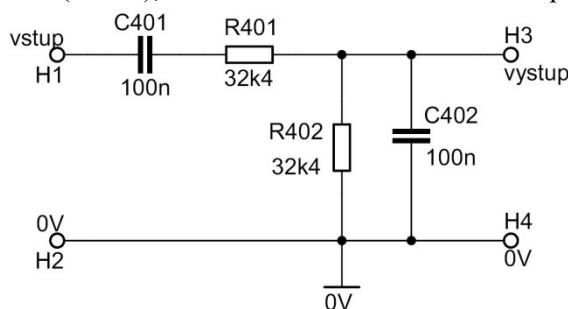
bitový. Nastavená přesnost je pro naše účely zcela dostačující. Mikroprocesor využívá pro zjišťování digitálního čísla tzv. aproximační metodu určování čísla (vhodná pro přesné a rychlé měřicí přístroje), takže každý převod čísla trvá stejnou dobu.

3.4 Reálné zapojení:

V kapitole principu činnosti bylo zjednodušeně vysvětleno, jak řídicí jednotka pracuje a jakým způsobem vytváří řídicí impulsy. Na řadu teď přichází vysvětlení popisu funkce jednotlivých integrovaných obvodů tvořící jednotlivé bloky a jejich účel.

Pro správnou funkci jednotky je potřeba na její vstup přivést synchronizační signál s frekvencí periody 50Hz. Amplituda signálu smí dosahovat až 100V, což dovoluje přivádět synchronizační signál přímo z výstupu sekundárního vinutí transformátoru, ke kterému je připojen tyristorový usměrňovač, jenž řídicí jednotka ovládá. Výhodou je, že v této koncepci zapojení nevzniká žádný fázový posuv mezi synchronizačním signálem a výkonovým napětím přiváděným na tyristor. Oddělení pomocí optočlenu nebo transformátorového oddělovače by do řízení vnášelo fázový posuv a řízení by nebylo přesné. Jinou variantou způsobu přivedení synchronizačního signálu na vstup je přes přesný lineární izolační zesilovač, což by konstrukci výrazně zkomplikovalo a vyžadovalo by použití dalšího zdroje napájení. Nejlepších výsledků bylo dosaženo bez galvanického oddělení. Vzhledem k tomu, že se konstrukce jednotky bude používat pro laboratorní účely, kde se napěťová úroveň bude pohybovat v řádu desítek voltů, nehrozí úraz elektrickým proudem.

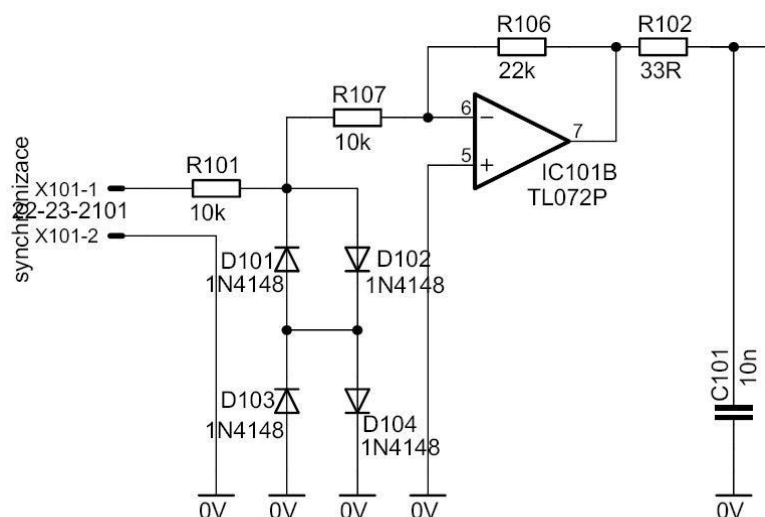
Jednotka je na vstupu vybavena filtrem, konkrétně RC pásmovou propustí typu Wienův článek, naladěný na rezonanční frekvenci pouze 50Hz. To zabráni průniku cizího rušení do komparátoru a umožní normální funkci jednotky. Wienův článek je použit z prostého důvodu. Podle frekvenční fázové charakteristiky je fázový posuv φ v rezonanci 0° . Filtr je navržen na zvláštní desce plošných spojů. Jiný typ filtru nepřipadá v úvahu, neboť by došlo k fázovému posuvu a tím k chybě řízení a vyhodnocení fáze. Pasivní Wienův článek má útlum přibližně -9dB, což je nepříznivé pro synchronizaci. Proto je v následujícím stupni signál přiveden na vstup operačního zesilovače (IC101), kde se útlum filtru částečně kompenzuje. [10]



Obr. 12. Schéma zapojení vstupního filtru typu pásmová propust (Wienův článek)

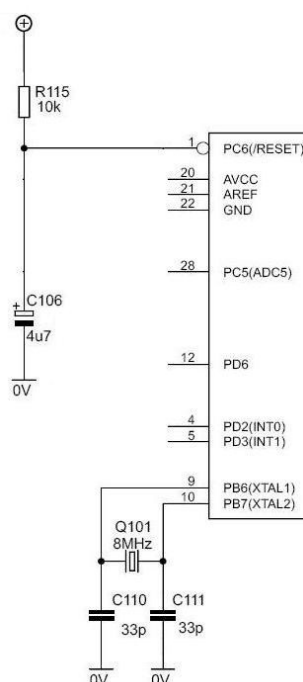
Synchronizační signál je přiváděn na vstup řídicí jednotky. Ten je poté omezen symetrickým diodovým omezovačem složený z diod D_{101} až D_{104} na hodnotu přibližně $\pm 1V$. Amplituda signálu na omezovači se mírně mění v závislosti na velikosti přiváděného synchronizačního napětí. Dále je signál veden přes pasivní RC filtr R_{102} a C_{101} naladěný na frekvenci přibližně 40kHz pro zamezení průchodu vysokofrekvenčního rušení na vstupu komparátoru a následně do

dalších částí obvodů. Na výstupu komparátoru se nachází tranzistor v zapojení se společným emitorem pro korekci napětových úrovní přiváděných na vstup mikroprocesoru.



Obr. 13. Schéma zapojení vstupní části pro synchronizační signál

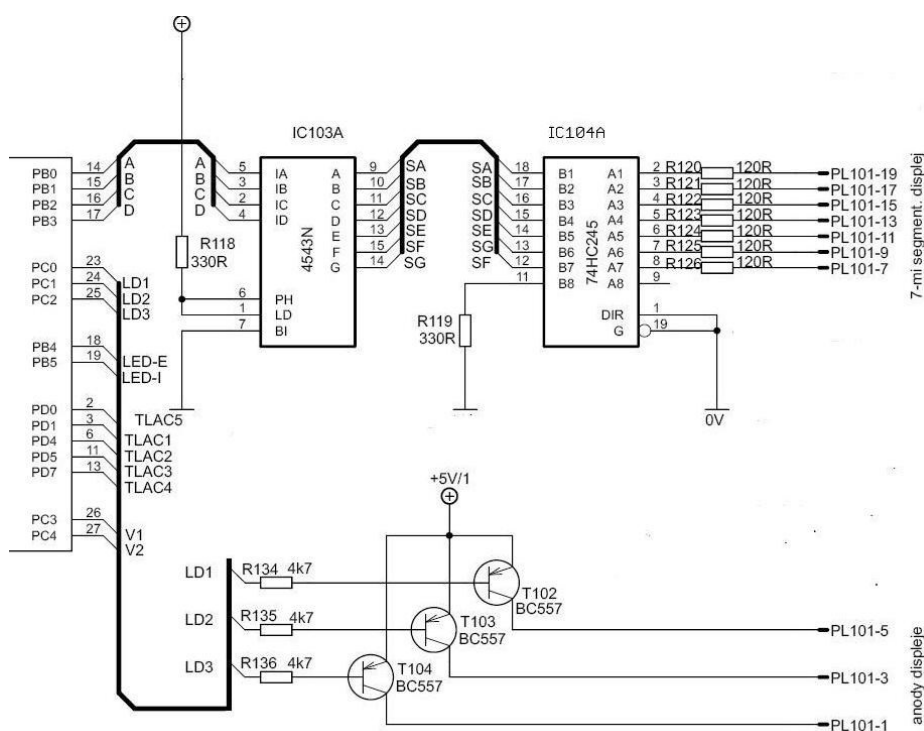
Pro analogové řízení se na vstup pro řídicí napětí přivádí napětové úrovně od 0V do 10V. Protože mikroprocesor dokáže zpracovat napětové hladiny maximálně 2,56V, musí být napětové úrovně korektně upraveny. K tomu slouží odporový dělič R_{111} a R_{112} . Jako ochrana proti přepětí nebo zápornému napětí je paralelně k děliči připojena Zenerova dioda sloužící jako ochranný prvek. Pro zamezení průniku vysokofrekvenčního rušení na vstup A/D převodníku je paralelně k děliči připojen blokovací kondenzátor. A/D převodník zabudovaný v mikroprocesoru vyžaduje samostatné napájení. Napájecí napětí je velice náchylné na zvlnění, proto je na napájecí straně připojen filtr sestávající se z cívky L_{102} a kondenzátoru C_{105} . Referenční zdroj napětí je také implementován uvnitř mikroprocesoru, vyžaduje pouze externí kondenzátor C_{107} .



Obr. 16. Schéma části zapojení hodinového obvodu a odvodu RESETu mikrokontroléru

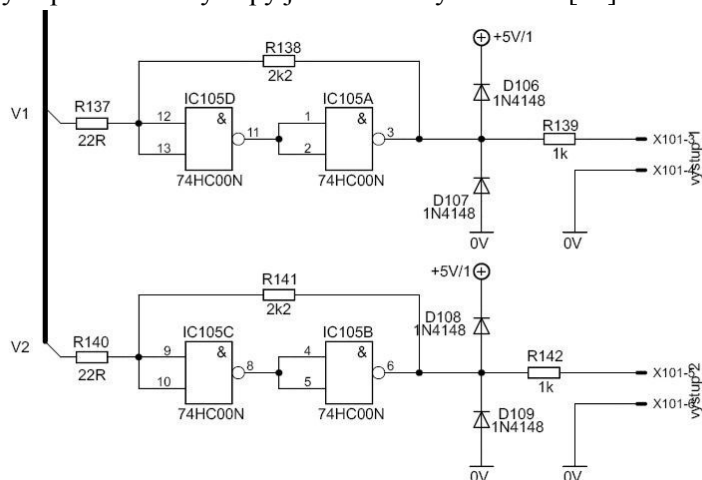
Ovládací prvky jsou umístěny na samostatné desce společně s displejem a indikačními LED diodami stavu řídicí jednotky. Vývody tlačítek jsou připojeny přes rezistory na vstupní piny mikroprocesoru, aby nedocházelo k přímému spojení výstupního pinu k nulovému potenciálu, což by vedlo k destrukci mikroprocesoru. Zvyšovací rezistory (tzv. pull-up rezistory) jsou programově nataveny uvnitř mikroprocesoru, takže není potřeba připojovat vnější rezistory.

Výstup pro displej je řízen systémem multiplex, který zobrazuje postupně všechna čísla za sebou. Není tak potřeba požívat pro každý displej zvláštní port na výstupu z mikrokontroléru, což zmenší počet požitých portů. Vypisování jednotlivých číslic (jednotek, desítek a stovek) z mikroprocesoru je provedeno pomocí BCD kódu, který nevyžaduje tolik výstupních pinů (konkrétně jen 4 piny - bity). Pro zobrazování čísel na displeji je použit dekodér kódu BCD (IC₁₀₃) s převodem na sedmi segmentový displej. Pro posílení proudivé zatížitelnosti následuje za dekodérem osmibitový budič (IC₁₀₄), který umožní odběr vyššího proudu než samotný dekodér pro sedmi segmentový displej. Přepínání anod displeje je provedeno pomocí trojice tranzistorů, které umožňují vyšší odběr proudu. Anodový proud displeje (jednoho čísla) dosahuje až 70mA. Takový proud mikroprocesor není schopen na výstupním pinu dodat. [11] [12]



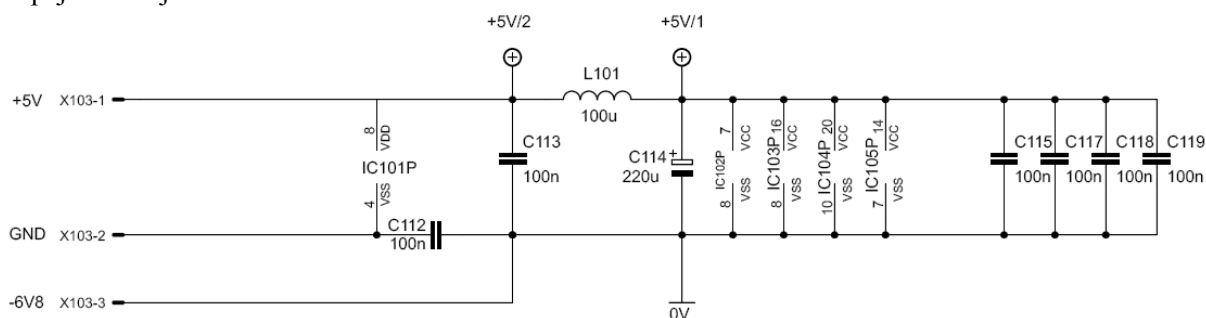
Obr. 17. Schéma části zapojení dekodéru kódu BCD/7 segmentový displej a budiče

Výstupní řídicí impulsy vystupující z mikroprocesoru jsou přivedeny na vstup tvarovače, sestaveného z hradel typu NAND (IC₁₀₅). Úkolem tohoto mezistupně je oddělit výstupní svorky jednotky od mikroprocesoru. Běžný tranzistor by pro oddělení výstupního pinu mikroprocesoru od výstupu jednotky dostačoval, ale nemá tak velkou rychlost náběhu a sestupu hrany jako tvarovač. Tyristory potřebují pro správné spuštění velkou strmou náběžnou hranu. Proto byla na toto místo přidána hradla sloužící jako tvarovač k modulaci velké strmosti hran. Navíc - hradlo NAND snese až dvojnásobně vyšší proudové zatížení na rozdíl od výstupního pinu mikroprocesoru. Ten snese pouhých 40mA. Výstup tvarovače je jištěn proti napětí přivedeného omylem na jeho výstup. Oba dva výstupy jsou chráněny diodami. [13]



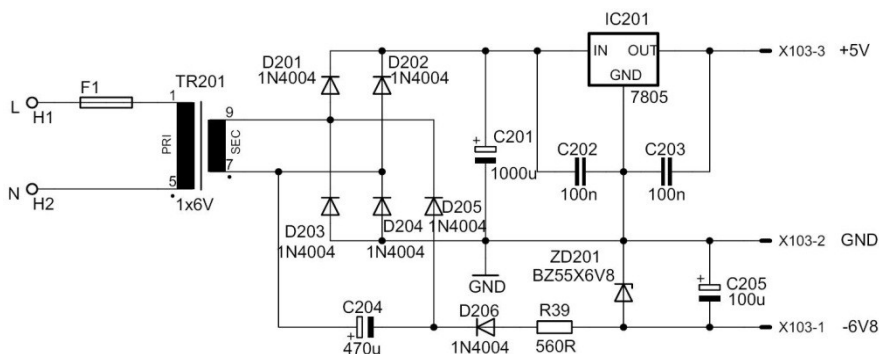
Obr. 18. Schéma zapojení výstupního obvodu – tvarovače

Napájecí část je rozdělena na analogovou napájecí část a digitální napájecí část. Digitální část je od analogové oddělena pomocí LC filtru tvořeného prvky L_{101} a C_{114} . Ten zamezí průnikům vysokofrekvenčního rušení šířící se po vedení do analogové části, napájecí komparátor. Tam by se rušení mohlo nepříznivě projevit na vyhodnocování průchodů synchronizačního signálu nulou. Pro přehlednost je analogové napětí označeno napájecí svorkou $+5V/2$ a digitální napájecí část je označena svorkou $+5V/1$.



Obr. 19. Schéma zapojení napájecí části na desce řídicí jednotky

Napájecí zdroj tvoří síťový transformátor zasazený do plošného spoje s jedním sekundárním vinutím. Střídavé napětí je usměrněno pomocí můstkového usměrňovače složeného ze čtveřice diod D_{201} až D_{202} . Usměrněné napětí je pak vyfiltrováno kondenzátorem C_{201} a stabilizováno stabilizátorem IC_{201} . Kondenzátory C_{202} a C_{203} jsou blokovací a slouží k zamezení průniku vf rušení do dalších částí obvodů. K sekundárnímu vinutí je připojen jednoduchý „zdvojovač napětí“, s jehož pomocí získáme záporné napětí potřebné pro činnost komparátoru. Pomocný zdroj záporného napětí se skládá ze dvojice diod D_{205} a D_{206} a kondenzátoru C_{204} . Získané napětí je poté stabilizováno Zenerovou diodou na hodnotu $-6,8V$. Protože proudový odběr komparátoru (operační zesilovač IC_{101}) je malý, tento zdroj malého záporného napětí zcela postačí.



Obr. 20. Schéma zapojení napájecího zdroje pro řídicí jednotku

3.5 Návrh a realizace:

Řídicí jednotka se rozkládá celkem na třech (čtyřech i s filtrem pásmové propusti) deskách plošných spojů. Je to zejména z důvodů rozměrových a bezpečnostních. Protože řídicí jednotka obsahuje vlastní síťový napájecí zdroj, tvoří síťový zdroj jednu ze tří částí plošných spojů. Celý návrh byl vytvořen ve vývojovém prostředí CAD softwaru *Eagle*

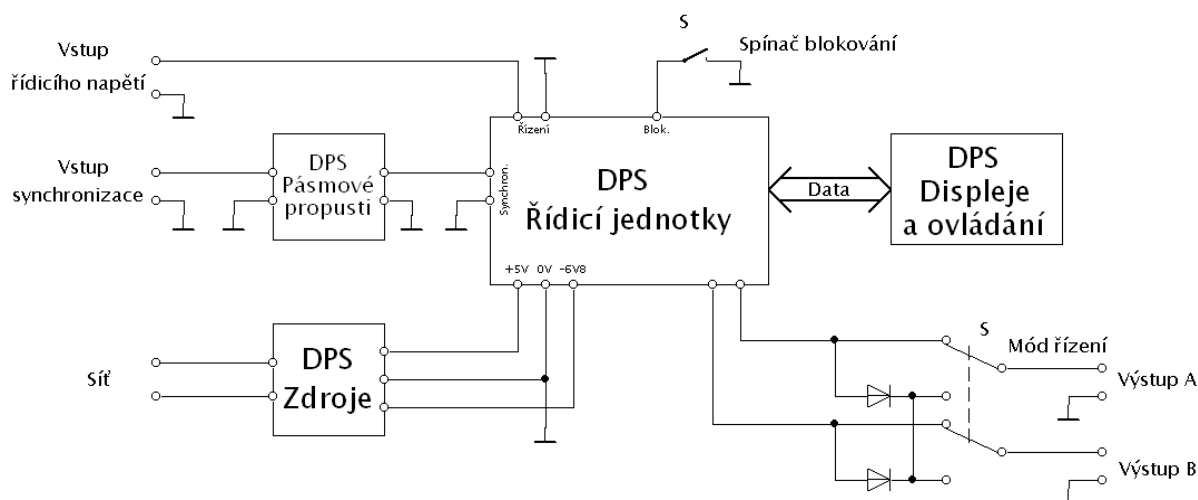
Zdroj obsahuje síťový transformátor zasazený do plošného spoje o výkonu 3VA a jmenovitém sekundárním napětí 6V. Ze zdrojové části pak získáme stabilizované napětí +5V a pomocné záporné napětí -6,8V pro napájení komparátoru v řídicí jednotce tvořené operačním zesilovačem. U operačního zesilovače by se totiž mohlo nepříznivě projevit zbytkové saturační napětí, které v lepším případě dosahuje 1,5V. Takže při úrovni „logické nuly“ by na výstupu komparátoru nebylo nulové napětí. Proto je zde použit pomocný zdroj záporného napětí. Komparátor má v nejhorším případě odběr maximálně 1mA, proto postačí tento jednoduchý zdvojovač napětí a nemusíme používat transformátor s dvojitým sekundárním vinutím. Primární část vinutí transformátoru je jištěna tavnou přístrojovou (trubičkovou) pojistkou.

Jak vyplývá z předchozího, řídicí jednotka je napájena symetrickým napětím o úrovních přibližně +5V a -5V. Napěťové úrovně nemusí být striktně symetrické. Postačí, když záporná část napájení bude minimálně -3V, aby byla zajištěna správná funkce komparátoru. Vzhledem ke složitosti zapojení a minimalizaci rozměrů byla sestavena na samostatné oboustranné desce plošných spojů. Většina vodivých cest je vedena spodní stranou desky kvůli snadnějšímu pájení. Horní část desky je využita pro delší spojení mezi jednotlivými částmi řídicí jednotky a zároveň je zbylá plocha využita jako „kostra“ sloužící k dodatečnému odstínění proti rušení. Na této desce jsou navrženy veškeré obvody zajišťující správný chod jednotky, veškeré řízení a ovládání.

Třetí část tvoří deska plošných spojů s displejem, indikačními LED diodami a tlačítky. Z této desky je řídicí jednotka interně ovládána. Displej obsahuje tři cifry pro zobrazování aktuální hodnoty nastaveného řídicího úhlu. Indikační LED diody jsou umístěny na levé straně od displeje. Je to čtveřice diod, jež ukazují stav řízení nebo řídicí jednotky. První LED dioda indikuje stav zapnutí řídicí jednotky (indikace připojení k napájecímu zdroji, tedy k síti). Další dva indikátory určují aktuální mód řízení (čili zda se jedná o řízení externí nebo řízení interní). Každý mód má samostatný ovládací prvek (tlačítko). Poslední LED indikuje zablokování řídicí jednotky. Plošný spoj displeje propojuje s deskou řídicí jednotky plochý, dvacetizářkový kabel, zakončený samořeznými konektory.

Celá jednotka je vestavěna do plastového boxu. Na zadní straně se nachází vstup pro analogové řízení a blokování jednotky, a dva výstupní kanály, sloužící k řízení bloku tyristorového usměrňovače. Jako propojovací konektory jsem zvolil tzv. banánkové zdířky. Jsou totiž univerzální a není potřeba používat těžko dostupné a drahé specializované konektory. Na čelním panelu se nachází ovládací a indikační prvky, sloužící pro nastavení a odečtení hodnot a komunikaci jednotky s obsluhou.

Blokové schéma elektrického zapojení desek plošných spojů mezi sebou v řídicí jednotce je zobrazeno na obr. 21. Vzhledem ke složitosti zapojení jsou desky zobrazeny jako jednotlivé bloky.



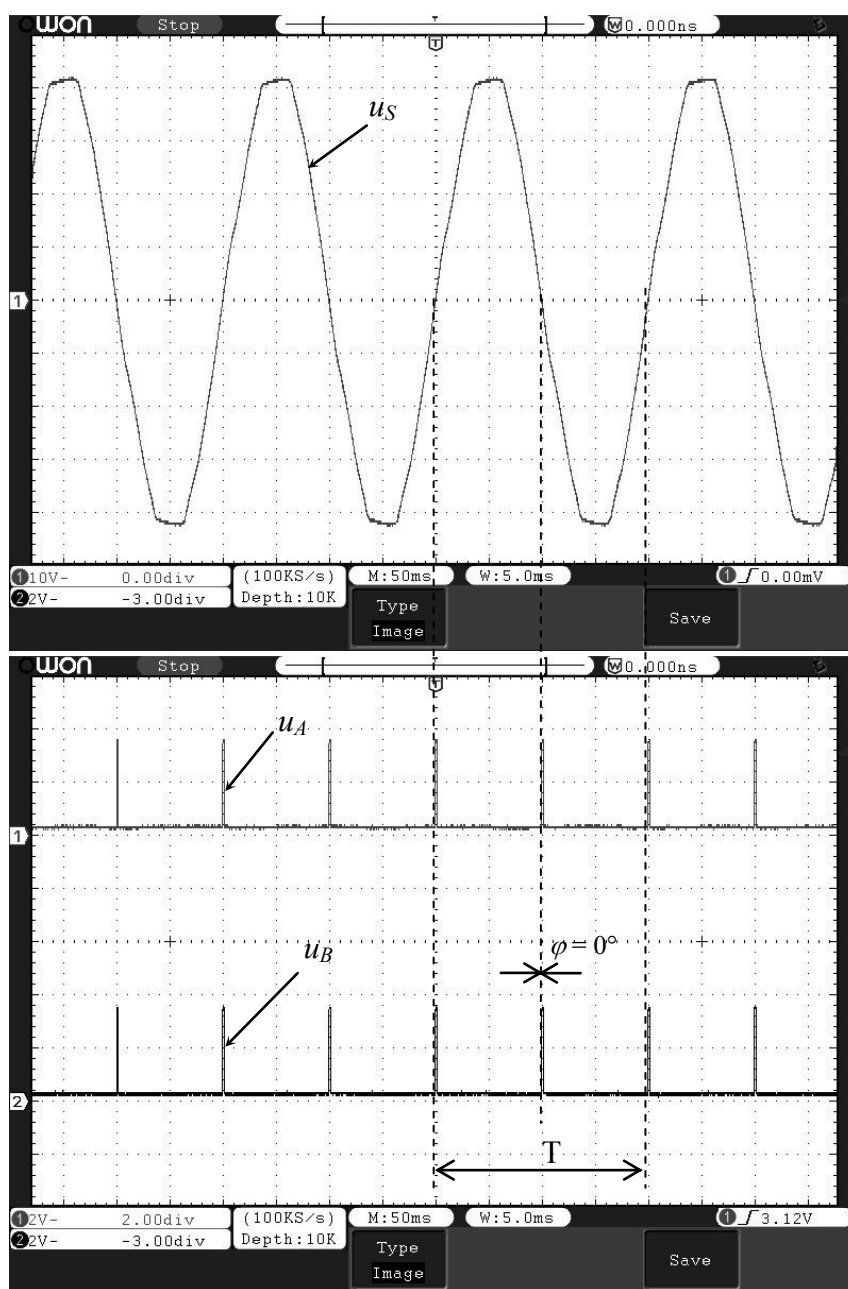
Obr. 21. Blokové schéma zapojení mezi jednotlivými deskami plošných spojů

3.6 Způsob řízení tyristorů:

Způsob řízení byl zvolen takový, aby zajistil správné spuštění tyristorů bez nežádoucích potíží. Jelikož má být jednotka používána v laboratořích pro demonstraci funkce tyristorového usměrňovače, umožňuje nastavit dva módy řízení tyristorů, z nichž jeden způsob umožní řízení tyristorů bez jakýchkoliv obtíží, a druhý způsob řízení umožňuje řízení bez obtíží jen do určité míry.

Jak je z praxe tyristorových usměrňovačů známo, je možné jednofázový usměrňovač řídit v rozmezí úhlů $0^\circ < \alpha < 180^\circ$. Vzhledem k tomu, že tyristor je součástka poměrně nedokonalá a „pomalá“ (zhoršené dynamické parametry), bývá maximální hodnota řídicího úhlu α snížena o hodnotu tzv. bezpečnostního úhlu γ , který se pohybuje okolo 20° . Takže největší použitelný úhel řízení může dosáhnout maximálních 160° . Nehrozí tak riziko nechtěného zapálení tyristoru v době, kdy obnovuje své blokovací schopnosti. Ve výsledku by se toto projevilo ztrátou kontroly nad usměrňovačem, což by způsobilo vedení proudu po celou polovinu periody. Na zátěž by to také mělo nepříznivý vliv. Například pro motorickou zátěž by náhlý proudový impuls znamenal velké mechanické rázy v motoru, nehledě na poháněný mechanismus. Nevýhodou je, že takto nechtěně sepnutý tyristor už nelze vypnout. Proud zanikne sám po poklesu střídavého napětí na nulovou hodnotu. Proto je důležité dodržovat bezpečnostní úhel.

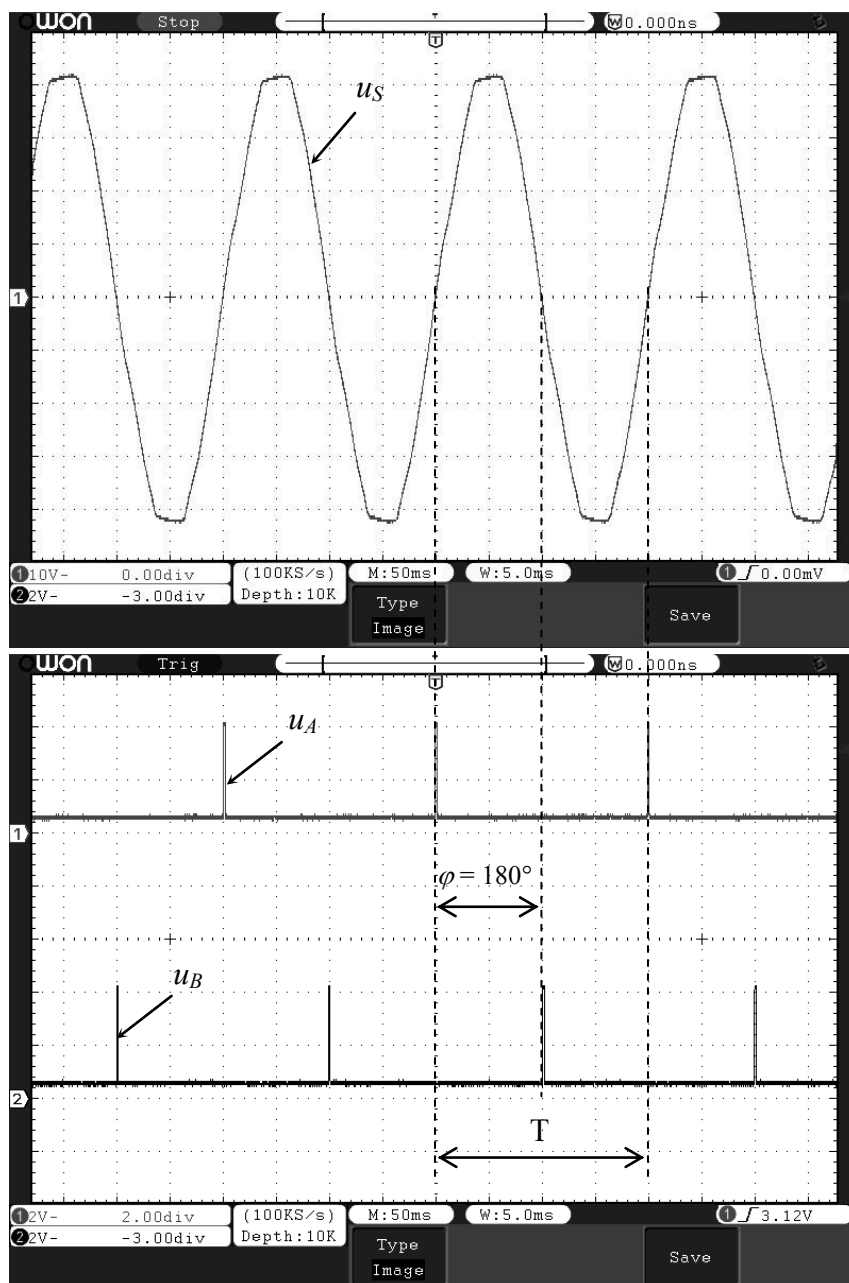
První způsob vytváření impulsů řídicí jednotky je řízení pomocí dvou dvojitých impulsů za periodu, vzájemně posunutých o 0° elektrických. Změřený průběh napětí je na ukázkou znázorněn na obr. 22. Řídicí jednotka vytváří soustavu impulsů dlouhých $100\mu s$ na obou výstupech současně bez ohledu na to, zda je na tyristoru závěrné nebo blokovací napětí. Zapalovací impuls je pak vytvořen po průchodu synchronizačního signálu nulovou hodnotou napětí (amplitudy) a zpožděn o dobu danou aktuálním nastavením řídicího úhlu. Při tomto módu řízení tyristoru je však třeba dbát na dodržení bezpečnostního úhlu, jinak se usměrňovač bude chovat nevyzpytatelně a snadno nad ním ztratíme kontrolu. V nejhorším případě dojde i k destrukci usměrňovače (například v případě můstkového plně řízeného usměrňovače by mohlo dojít tyristorů v anodové i katodové skupině).



Obr. 22. Řízení tyristorů pomocí dvou dvojitých impulsů (na obou výstupních kanálech řídicí jednotky současně) vzájemně posunutých o 0° elektrických pro aktuální úhle řízení $\alpha = 0^\circ$

Jako druhý vhodnější způsob řízení se zdál být systém dvou jednotlivých impulsů posunutých o 180° elektrických. Příklad průběhů zapalovacích impulsů je zobrazen na obr. 23. Řízení probíhá spouštěním pouze tyristorů, na kterých je blokovací napětí. Na tyristory, na nichž je závěrné napětí, se řídicí impuls nepřivádí. Spuštění tyristoru je určeno z polarit synchronizačního signálu. Pro kladné napětí bude aktivován jeden výstup jednotky a pro záporné pak druhý výstup. Velkou výhodou tohoto řízení je eliminace poruchy komutace. Tyristory tak mají celou polovinu periody na obnovení svých blokovacích schopností. Podobného principu využívají i výkonové usměrňovače pro průmyslové využití. Na výstupu jednotky se objevují impulsy

sloužící ke spínání tyristorů o délce trvání $100\mu\text{s}$ vytvořené po průchodu synchronizačního signálu nulovým napětím. Impulzy se vytváří s časovým zpožděním daným aktuální hodnotou nastaveného řídicího úhlu α .

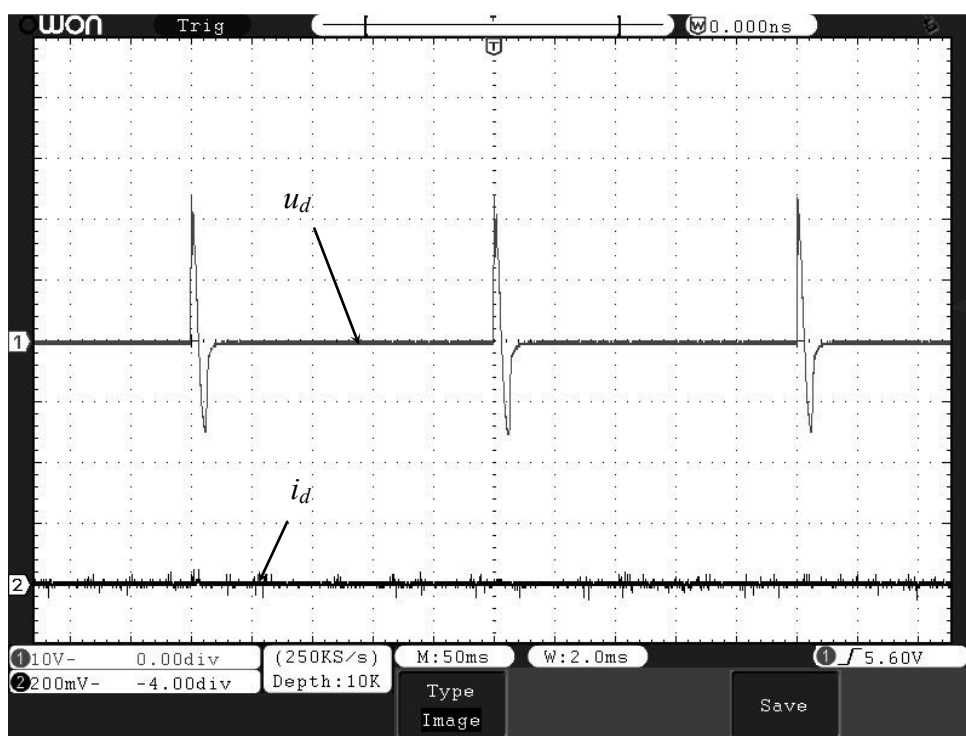


Obr. 23. Řízení tyristorů pomocí dvou jednotlivých impulsů (na obou výstupních kanálech řídicí jednotky rozděleně) vzájemně posunutých o 180° elektrických pro aktuální úhly řízení $\alpha = 0^\circ$

V ideálním případě je délka trvání impulsu $100\mu\text{s}$ dostatečná k zapálení tyristoru. V reálném případě však impuls zcela jistě nebude dostatečně dlouhý a tyristorový usměrňovač nebude schopen pracovat s jinou zátěží než odporovou. V případě odporově induktivní či induktivní zátěže se situace výrazně zhorší. Vysoká hodnota indukčnosti brání rychlému nárůstu proudu

zátěži. Krátký impuls přivedený na řídicí elektrodu tyristoru nemusí zajistit správné spuštění tyristoru. Může nastat situace, že hodnota propustného proudu za dobu trvání impulsu nemusí dosáhnout požadované hodnoty přídržného proudu tyristoru a po odeznění řídicího impulsu přejde tyristor opět do blokovacího stavu. Proto je vhodné v následujícím stupni připojeném k řídicí jednotce impuls dále upravit.

Na obr. 24 je zobrazen průběh napětí a proudu neuskutečněného zapálení tyristoru. Položený usměrňovač napájel RL zátěž. Protože indukčnost zátěže byla příliš velká, proud zátěže nedosáhl potřebné velikosti a po odeznění zapalovacího impulsu zůstal tyristor uzavřený. V průběhu můžeme vidět překmit napětí u_d do kladných hodnot a po odeznění zapalovacího impulsu napětí na zátěži vlivem indukčnosti zátěže zase klesá do záporných hodnot. Průběh proudu i_d se téměř nezměnil.



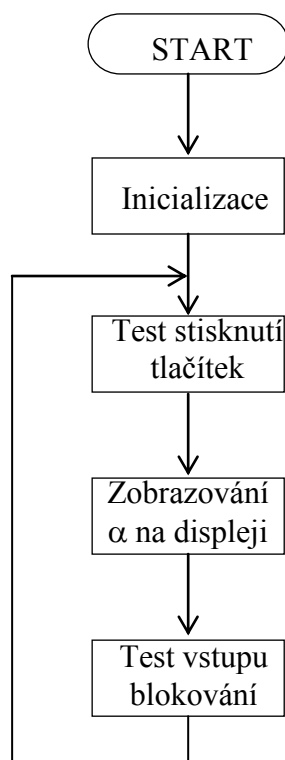
Obr. 24. Neuskutečněné zapálení tyristorů při velké hodnotě indukčnosti RL zátěže (shora) průběh napětí na zátěži a proudu na zátěži

4 Řídicí software:

Ovládací software řídicí jednotky je navržen tak, aby pracoval vždy, i za nepříznivých okolností. Byl navržen ve vývojovém prostředí *AVR Studio* od firmy *Atmel*. Programovacím jazykem byl zvolen assembler. Zdrojový kód je uveden v příloze.

4.1 Vykonávání hlavního smyčky programu:

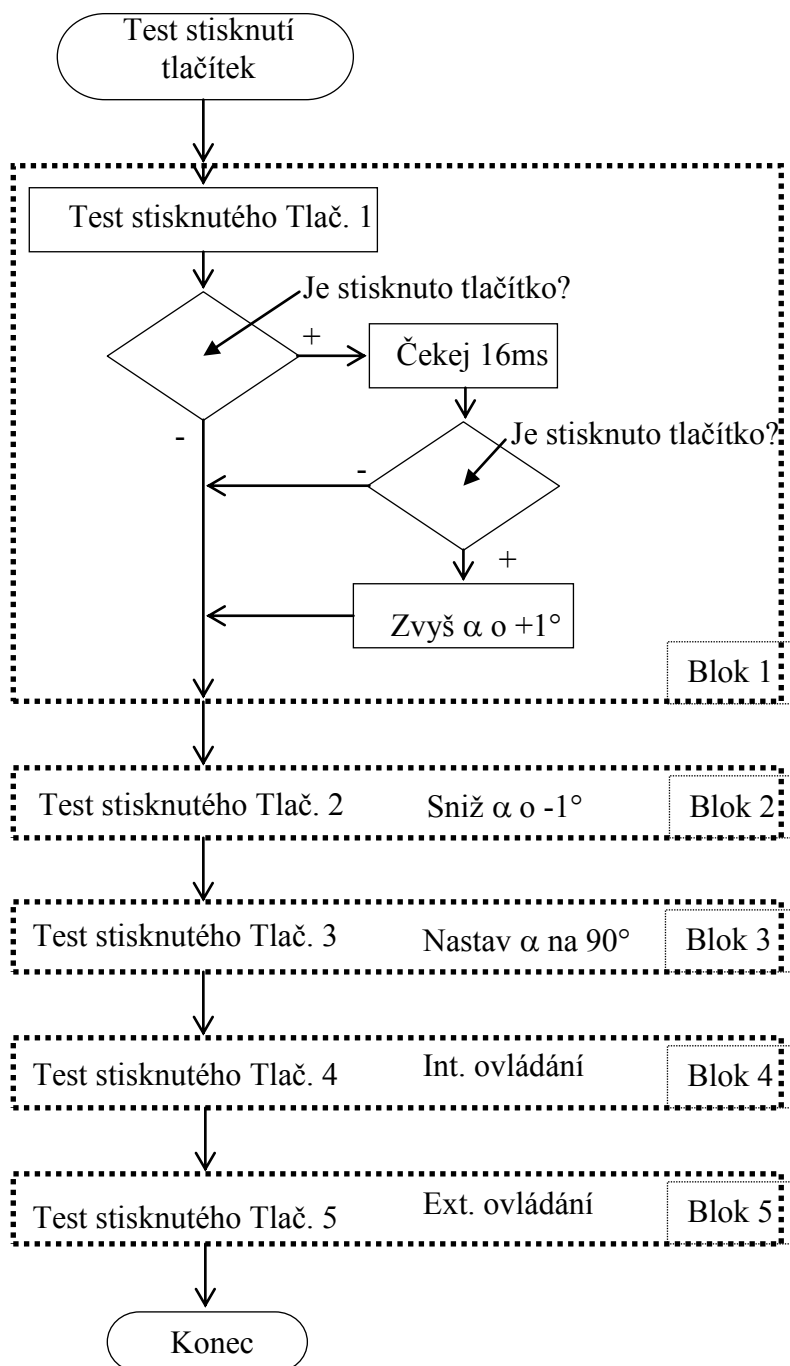
Vývojový diagram je zobrazen na obr. 25. Nejprve se provede inicializace mikroprocesoru, kde se nastaví veškeré periferie, jako jsou časovače, A/D převodník, vstupy vnějšího přerušení, vstupně výstupní porty apod. Poté se přejde na chod vykonávání hlavního programu, provádějící testy stisknutých tlačítek, výpočet aktuální hodnoty řídicího úhlu α a jeho následné vypisování jednotlivých číslic na displej (multiplex), a test vstupu pro blokování řídicí jednotky. Ostatní procesy týkající se řízení tyristorů se provádí v rutině přerušení. Tyto budou dále vysvětleny. Vzhledem k velkému rozsahu hlavního programu, jsou jeho jednotlivé bloky rozděleny na menší části (bloky), kvůli přehlednosti.



Obr. 25. Vývojový diagram hlavního programu řídicí jednotky

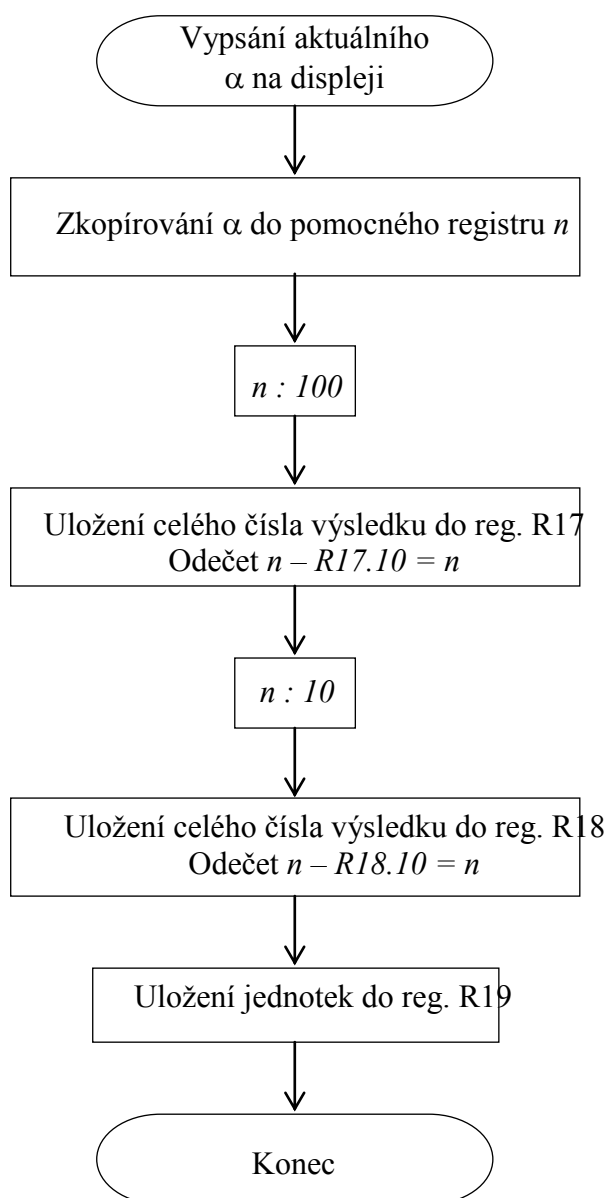
Po inicializaci mikroprocesoru program začne vykonávat testování všech pěti tlačítek. Stisknutím jednoho z nich dojde k přeskočení na návěští a vykonání funkce příslušící danému tlačítku. Po vykonání funkce se program vrací zpět na místo, kde došlo k přeskočení. První dvě tlačítka nastavují řídicí úhel o jeden stupeň výše nebo o stupeň

níže. Třetí tlačítko je doplňkové a jeho funkcí je nastavení řídicího úhlu na 90 stupňů. Všechna tři tlačítka provádí interní řízení jednotky. Další dvě tlačítka pak volí mód řízení, zda bude jednotka ovládána pomocí interního nebo externího řízení. Výběr módu je indikován LED diodou na čelním panelu. Vývojový diagram testování tlačítek je na obr. 26.



Obr. 26. Vývojový diagram části hlavního programu z obr. 25 pro testování stisknutých tlačítek (blok 1 až 5 mají stejnou strukturu jako zobrazený blok 1, liší se pouze vykonávanou funkcí při stisku)

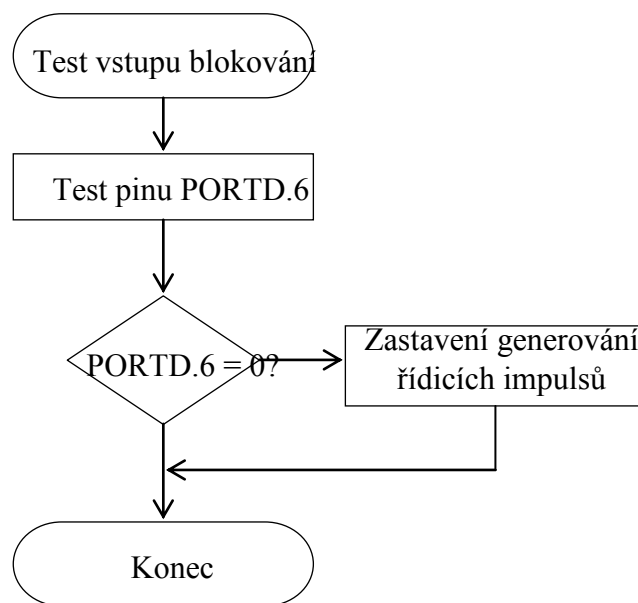
Protože mikrospínače mohou zakmitávat (to je dáno mechanickou konstrukcí), je v mikroprocesoru zařazen program na eliminaci zakmitávání tlačítek. Jeho princip je jednoduchý. Stisknutím tlačítka dojde přeskočení programu na návěští čekací rutiny, kde program setrvává přibližně 16ms. Mezitím zákmit tlačítka odezní a program se vrátí zpět na místo přeskočení. Zde se provede ještě jedna kontrola sepnutého tlačítka, a pokud je stále sepnuté, teprve poté může mikroprocesor provést příslušnou změnu podle stisknutého tlačítka. Pokud se jednalo jen o krátký překmit naindukovaný na výstupní pin mikroprocesoru, funkce bude přeskočena (nevykonána) a program pokračuje dále. Po otestování tlačítek se začne provádět algoritmus vypisování jednotlivých cifer na displeji. Aktuální velikost řídicího úhlu je nejprve zkopírována do pomocného registru pro další zpracování. Zde získáme číslo, které může nabývat hodnot 0 až 180. Pro názornost provedme příklad. Na řídicí jednotce máme nastaven úhel 163 stupňů. Číslo je nejprve poděleno číslem 100. Po vydělení vložíme číslo do registru pro vypisování stovek na displeji. Zbytek desetinného čísla je nepotřebný. Od čísla 163 odečteme číslo 100. Nyní zbude jen desítkové číslo 63. Toto podělíme deseti, celé číslo uložíme do registru pro vypisování desítek na displeji a zbytek desetinného čísla je opět nepotřebný. Od 63 znovu odečteme n násobek čísla deset (v tomto případě číslo 60) a zbudou nám pouze jednotky. Ty jsou vloženy do registru pro vypisování jednotek. Čísla ze všech tří registrů jsou pak multiplexně posílána na displej (viz níže). Takto lze rozdělit binární číslo, aby ho bylo později možné v desítkové soustavě zobrazit na displeji. Vývojový diagram vypisování aktuálně nastaveného řídicího úhlu je na obr. 25.



Obr. 27. Vývojový diagram části hlavního programu z obrázku č. 1 pro vypisování aktuálně nastaveného řídicího úhlu α na displeji

Jako poslední část hlavní smyčky programu se provádí test sepnutí blokovacího spínače (případně externího blokování). Vývojový diagram testování blokovacího vstupu je na obr. 28.

Program testuje příslušný vstupní pin mikroprocesoru, zda je aktivováno blokování. Je-li blokování aktivováno, program zakáže vytváření řídicích impulsů na výstupu jednotky. V případě neaktivovaného blokování program pracuje běžným způsobem. Po kontrole vstupu blokování se program vrací zpět na kontrolu stisknutých tlačítek.



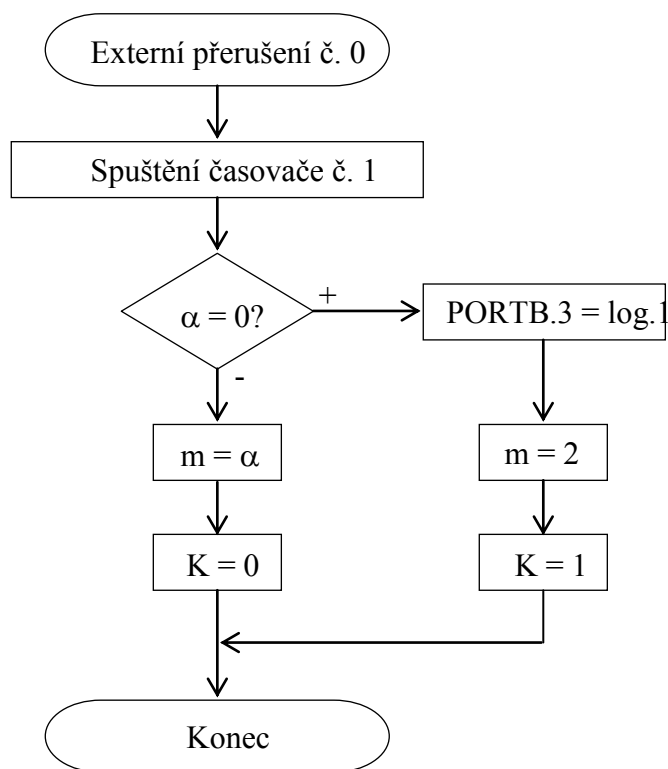
Obr. 28. Vývojový diagram části hlavního programu z obr. 25 pro kontrolu vstupu vnějšího blokování jednotky

4.2 Externí přerušení:

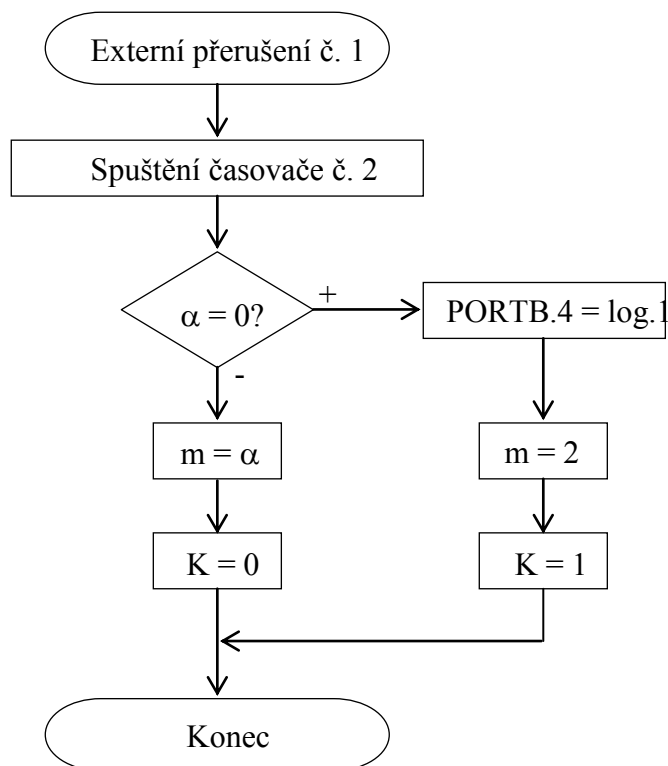
Pro zajištění synchronizace řídicí jednotky je na jejím vstupu zapojen analogový komparátor z operačního zesilovače, na jehož výstupu je pro přizpůsobení napětíových úrovní mikroprocesoru připojen tranzistor. Synchronizace řídicí jednotky je řešena přes oba externí vstupy přerušení. Jeden z nich je citlivý na náběžnou hranu, druhý na hranu sestupnou. Každý vstup pak spouští svůj časovač. Je tak zaručena správná funkčnost jednotky a možnost vytváření řídicích impulsů, závislých na polaritě synchronizačního signálu. Lze tedy řídit každý tyristor separovaně. Následující popis rutiny externího přerušení je shodný pro obě části. Liší se pouze v použitých perifériích a citlivostí na hranu. Vývojové diagramy obou rutin přerušení jsou na obr. 29 a obr. 30.

Přivedením náběžné hrany na vstup externího přerušení prvního kanálu dojde k přeskočení z vykonávání hlavního programu na obsluhu zdroje přerušení. V první řadě je do sériové paměti mikroprocesoru (Stack Pointer) uložena hodnota stavového registru mikroprocesoru (Status Registr), aby po návratu z přerušení nedošlo k zavedení chybných proměnných. Poté se začne s obsluhou samotného přerušení od externího přerušení. Zde dojde k aktivaci časovače. Po jeho spuštění je obsah sériové paměti vrácen zpět do stavového registru a program se navrátí zpět na původní místo, než došlo k přerušení.

Sestupná hrana synchronizačního signálu způsobí skok hlavního programu na obsluhu druhého externího přerušení. Situace je zde obdobná jako v předchozím případě přerušení. V rutině přerušení dojde k aktivaci druhého časovače. Po jeho spuštění se program vrací na své původní místo před přerušením.



Obr. 29. Obsluha přerušení z externího vstupu (INT0) mikroprocesoru



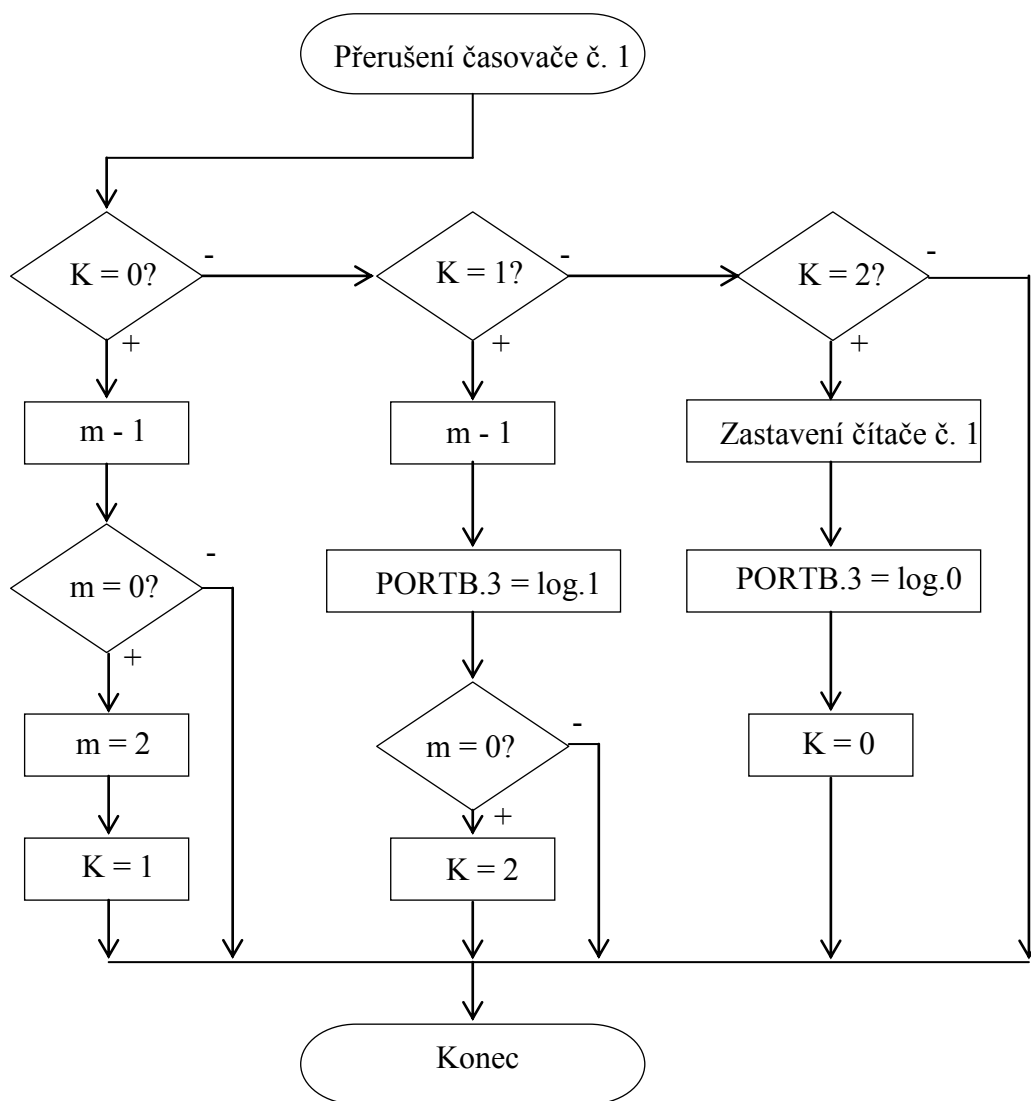
Obr. 30. Obsluha přerušení z externího vstupu (INT1) mikroprocesoru

4.3 Přerušení od časovačů:

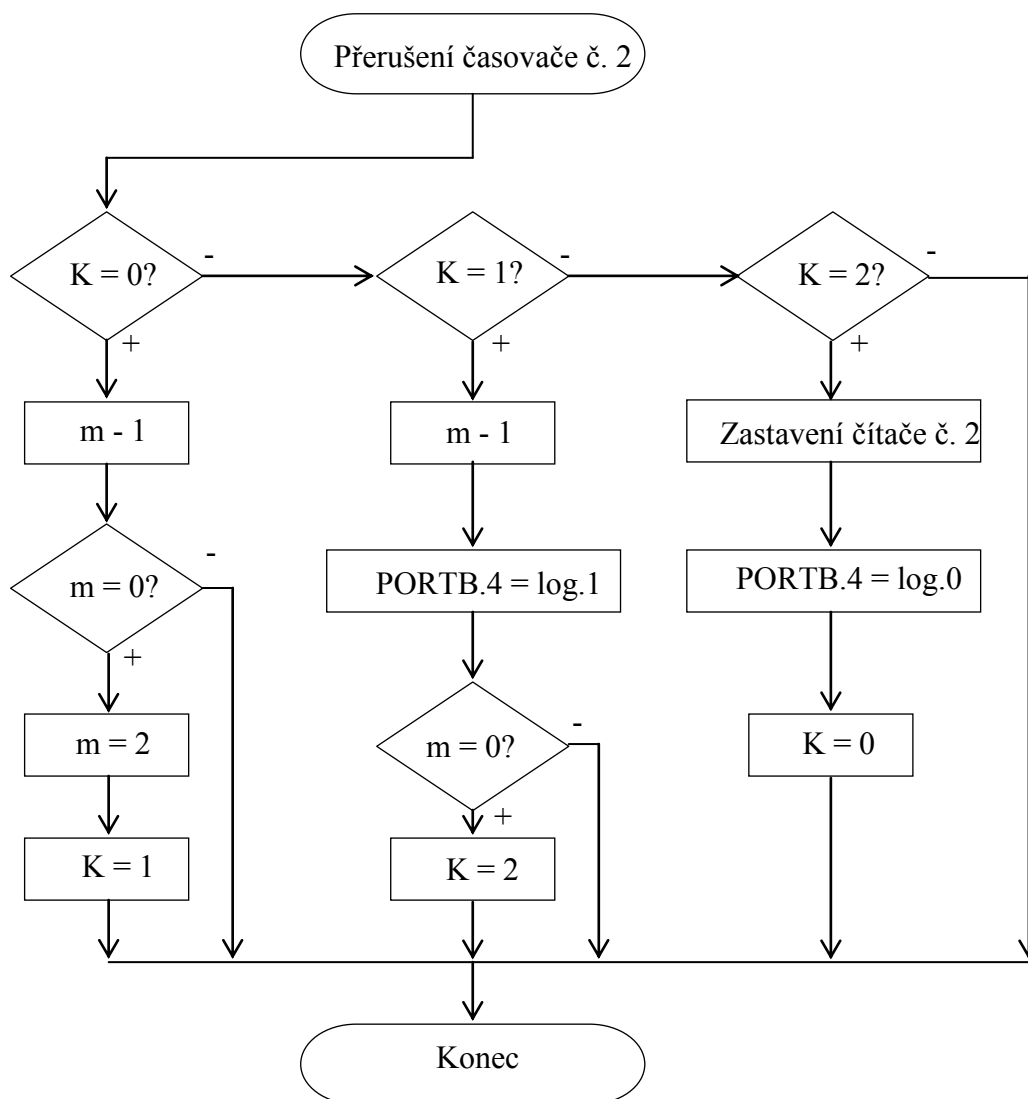
Jak bylo zmíněno výše, časovače jsou aktivovány z rutiny externího přerušení. Zbývá vysvětlit, co nastane v časovačích 1 a 2.

Časovače implementované ve struktuře mikroprocesoru plní funkci fázového řízení tyristorů. Do jejich komparačních registrů časovačů jsou vloženy konstanty, které vyvolají přerušení vždy po 55,5 μ s. To je dáno z výpočtu uvedeného níže. Číslo tvoří konstantu časového zpoždění od počátku průchodu synchronizačního signálu nulou až po vytvoření řídicího impulsu při řídicím úhlu α rovná 0°. Potom počet přerušení časovačů je závislý na aktuálním řídicím úhlu α (tzn. $\alpha = 160^\circ$, potom se přerušení časovačů vyvolá 160 krát a poté teprve dojde k sepnutí tyristoru). Pro oba časovače je nastavení stejné. Každý je však spouštěn jiným zdrojem přerušení. Vývojové diagramy obou rutin přerušení jsou na obr. 31 a obr. 32.

Po aktivaci časovače dochází k inkrementaci jeho vnitřního registru až do hodnoty 55,5 μ s. Poté dojde k přerušení a následnému porovnání velikosti řídicího úhlu a aktuálního počtu přerušení. To se probíhá tak dlouho, dokud počet přerušení od časovačů není shodný s řídicím úhlem α . Poté se na výstupním pinu mikroprocesoru objeví stav log.1, jehož délku trvání rovněž určuje příslušný časovač. Do komparačního registru se vloží hodnota 2. To znamená, že časovač provede ještě dvě přerušení po dobu trvání řídicího impulsu. Impuls má tedy délku 111 μ s. Po druhém přerušení časovače se výstupní napětí na pinu překlopí do log.0 a časovač se zastaví. Tímto způsobem probíhá generování řídicích impulsů pro zapalování tyristorů. Je jasné, že řídicí impuls se bude tím více zpožďovat, čím vyšší bude řídicí úhel α . Princip vytváření řídicích impulsů je shodný pro oba časovače (pro časovač 1 i časovač 2)



Obr. 31. Obsluha přerušení časovače (T/C 1)

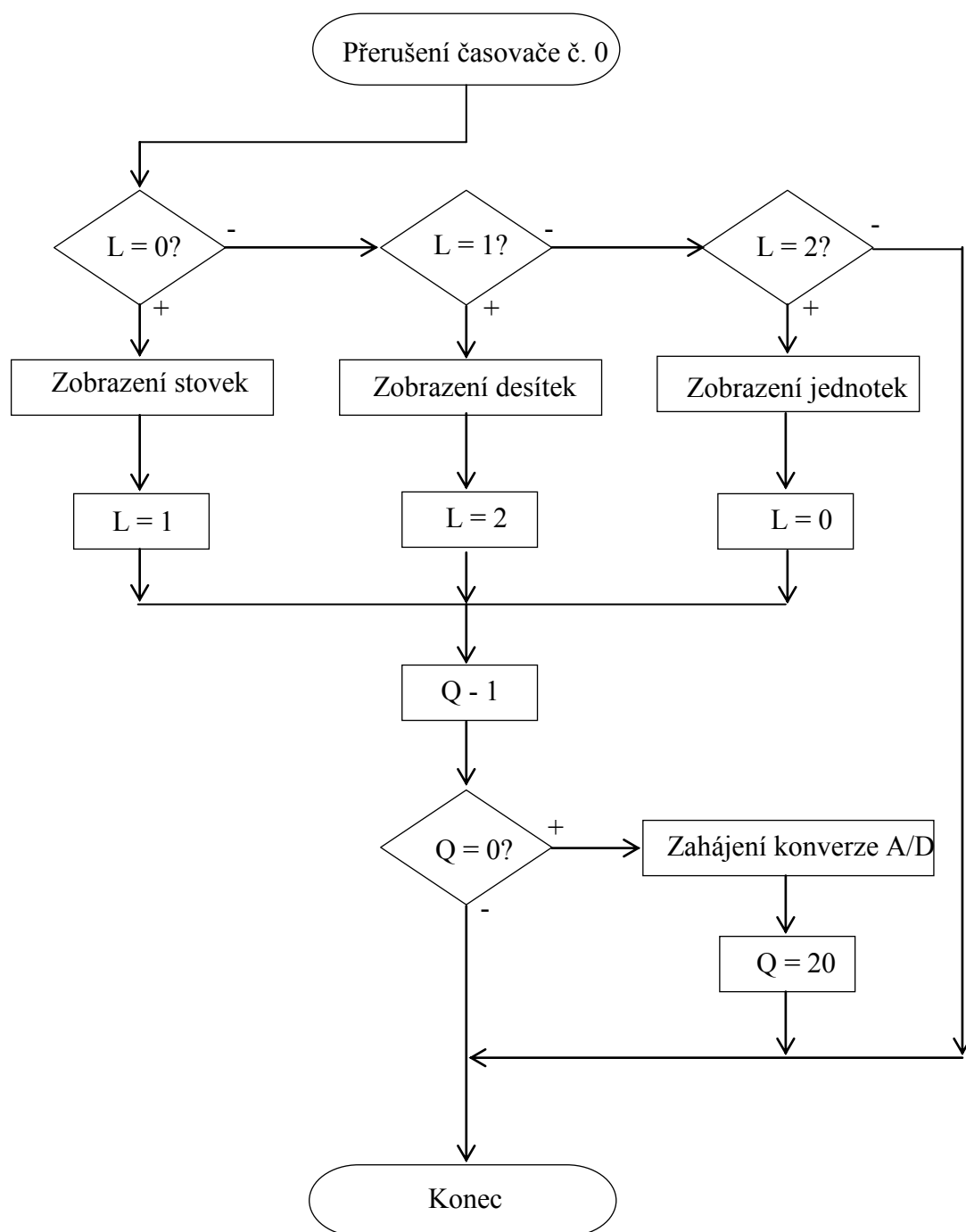


Obr. 32. Obsluha přerušení časovače (T/C 2)

Třetí časovač (označení časovač 0) se na vytváření řídicích impulsů nepodílí. Jeho hlavní činností je zajistit zobrazování čísel na displeji. Disponuje nejmenším počtem funkcí, a proto byl použit pro tyto účely. Je nastaven tak, aby vždy po 16ms vygeneroval přerušení a vypsál jedno číslo na displeji. Na začátku cyklu nejprve dojde k vypsání stovkového čísla na displeji. To zůstane zobrazeno po celou dobu dalšího čítání časovače 0. Po dalším přerušení stovkové číslo zhasne a zobrazí se číslo desítkové. Nakonec se na displeji zobrazí jednotkové číslo a cyklus se dále opakuje od začátku. Ve výsledku zobrazované číslo na displeji vypadá, jako by všechny cifry svítily najednou.

Funkce časovače 0 nezajišťuje jen zobrazování čísel na displeji. Protože je to časovač, který se během práce programu nikdy nezastaví, zároveň poslouží jako spouštěč převodu A/D převodníku. Jeho funkce bude popsána později. Převodník je spouštěn vždy po 328ms a provede převod analogové hodnoty řídicího napětí na

digitální číslo. Počet převodů je přibližně 3 krát za sekundu. Vývojový diagram rutiny přerušení časovače 0 je na obr. 33.

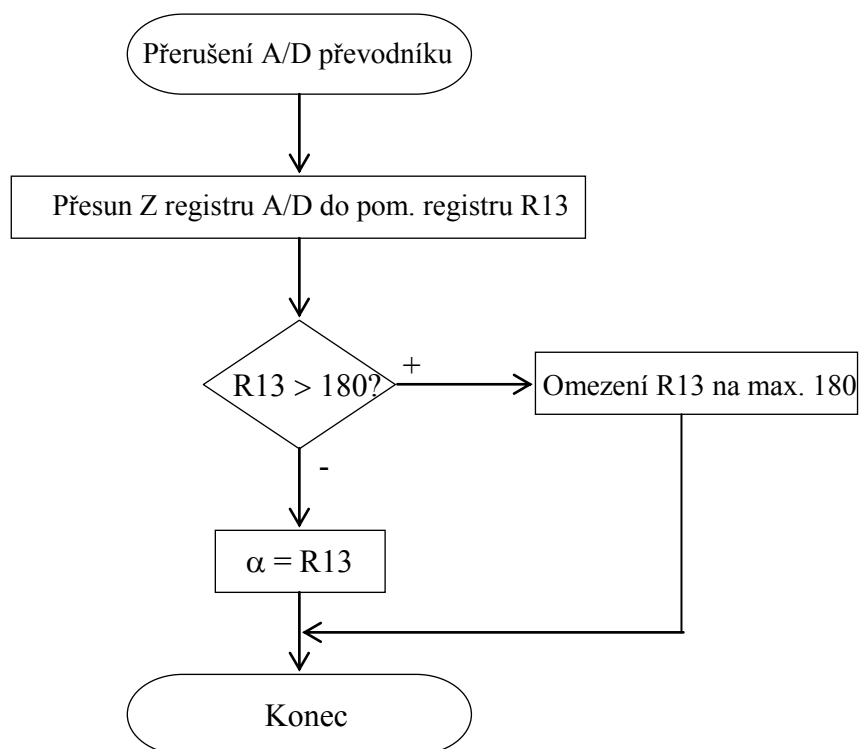


Obr. 33. Obsluha přerušení časovače (T/C 0)

4.4 A/D převodník:

Pro externí nastavení řídicího úhlu je v řídicí jednotce použit zabudovaný A/D převodník. Ze získaného digitálního čísla se provede nastavení řídicího úhlu. Jak bylo zmíněno výše, převod se uskutečňuje přibližně třikrát za sekundu, což je dostačující. Princip řízení je následující.

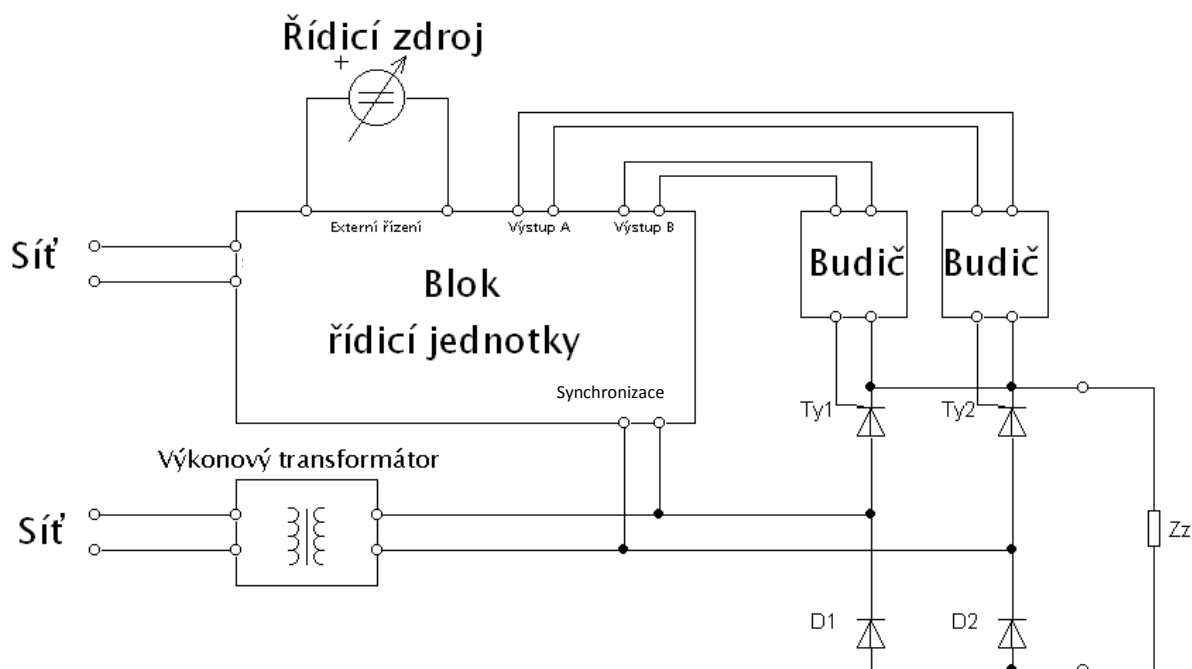
Po spuštění časovače 0 se provede konverze analogového napětí na digitální číslo. Po dokončení konverze se obsah registru A/D převodníku zkopíruje do pomocného registru. Zde dojde ke kontrole aktuální hodnoty, a pokud je číslo vyšší než 180 (maximální úhel řízení), do pomocného registru se vyšší hodnota nezkopíruje (tzn. vyšší než 180). Jedná se o jakési omezení (ochranu) proti nastavení vyššího řídicího úhlu než povolených 180°. Pokud je však číslo menší než 180, funkce programu je normální, a obsah A/D převodníku je používán pro řízení fázového spínání tyristorů. Vývojový diagram rutiny přerušení A/D převodníku je na obr. 34.



Obr. 34. Obsluha přerušení A/D převodníku

5 Kontrolní měření a ověření funkce:

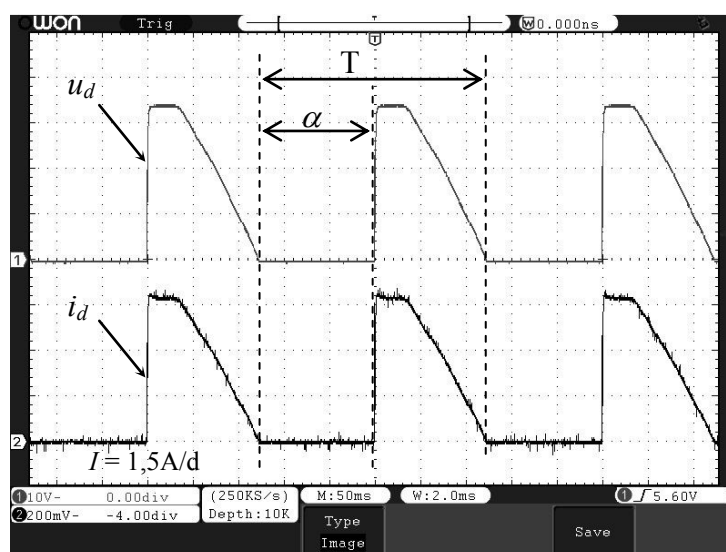
Pro ověření správné funkčnosti řídicí jednotky jsem se rozhodl provést kontrolní měření, které ověří, funkčnost jednotky ovládat tyristorový usměrňovač. Jednotka byla do obvodu zapojena způsobem, jaký je zobrazen na obr. 35. Zapojení usměrňovače jsem zvolil polořízený můstek. Ten je pro naše účely odzkoušení dostačující. Demonstrační měření bylo provedeno pro oba módy řízení (tj. systém dvou jednotlivých impulsů za periodu a systém dvou dvojitých impulsů za periodu) s různými typy nepoužívanějších zátěží. Mezi ně patří zátěž odporová, která se v praxi málokdy používá samostatně. Většinou se odporová zátěž vyskytuje v kombinaci s indukčností. Druhá zátěž byla tedy odporově induktivní (RL) s nulovou diodou, kterou tvoří sám tyristorový polořízený usměrňovač. Třetí typ zátěže byl motor (motorická zátěž – v praxi nejvíce využívaná).



Obr. 35. Blokové schéma zapojení řídicí jednotky k jednofázovému polořízenému usměrňovači

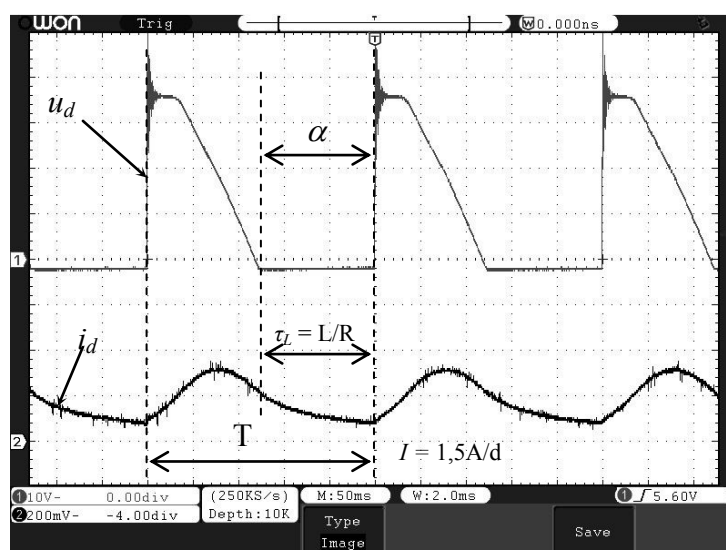
Každý typ zátěže je změřen při různých typech velikostí řídicího úhlu α , aby byla zobrazena funkce řídicí jednotky v celém svém rozsahu řízení. Vzhledem k velkému počtu průběhů jsou tyto zobrazeny v příloze v závěru práce.

Nejprve bylo provedeno řízení za pomoci dvou jednotlivých impulsů fázově posunutých o 180° elektrických. Pro odporovou zátěž (R) můžeme vidět, že průběh proudu kopíruje průběh napětí bez jakéhokoliv fázového posunu v průběhu všech velikostí řídicího úhlu α .



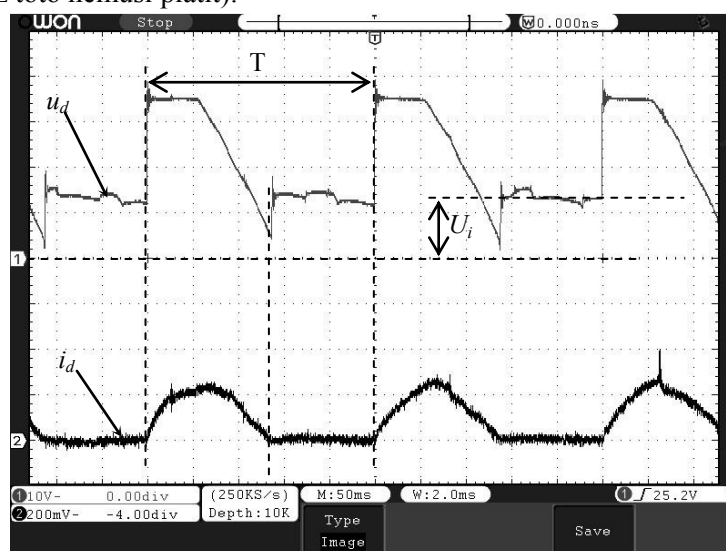
Obr. 36. Průběh (shora) napětí u_d a proudu i_d odporové zátěže při úhlu řízení $\alpha = 90^\circ$ (pro i_d platí $I = 1,5A/d$ ilek)

V případě induktivně odporové zátěže s nulovou diodou (RL s D_0) se situace poněkud mění. Fázový posun mezi napětím a proudem je dán velikostí řídicího úhlu α . Z průběhu také můžeme vidět, že zátěži protéká trvalý proud. To je způsobeno indukčností zapojenou do zátěže. Protože se jedná o polořízený usměrňovač, RL zátěž se chová, jako by k ní byla připojena nulová dioda. Tu však tvoří samotný polořízený usměrňovač. Nulová dioda je tvořena vždy jedním prvkem z anodové skupiny a jedním prvkem z katodové skupiny v jedné větvi (tedy dioda D_1 a tyristor Ty_1 nebo D_2 a Ty_2). V případě plně řízeného můstkového usměrňovače by bylo potřeba nulovou diodu do zapojení doplnit. Plně řízený usměrňovač totiž žádnou nulovou diodu ve své struktuře nemá a okamžitá hodnota napětí na zátěži tedy může klesat až do záporných hodnot. U ideální indukční zátěže by trvalý proud zátěži protékal až do velikosti α rovné 90° . Jelikož v sérii s indukčností je zapojen rezistor (odporová zátěž), bude trvalý (nepřerušovaný) proud protékat do hodnoty $\alpha < 90^\circ$.



Obr. 37. Průběh (shora) napětí u_d a proudu i_d odporově indukční zátěže při úhlu řízení $\alpha = 90^\circ$ (pro i_d platí $I = 1,5A/d$ ilek)

Pro motorickou zátěž jsou průběhy napětí a proudu odlišné od předchozích dvou typů zátěží. Otáčením stejnosměrného motoru se na jeho přívodech objeví stejnosměrné napětí U_i o určité napěťové hladině. Velikost naindukovaného napětí je závislá na rychlosti otáčení motoru (obecně platí, že čím jsou vyšší otáčky motoru, tím je naindukované napětí větší). Pracující motor je tedy sám zdroj napětí. Podle tohoto se bude odvíjet i odběr proud motoru. Ten má spíše impulsní charakter a šířka impulsu proudu závisí na zatížení motoru (myšleno pro α rovno 0° , při jiném úhlu už toto nemusí platit).



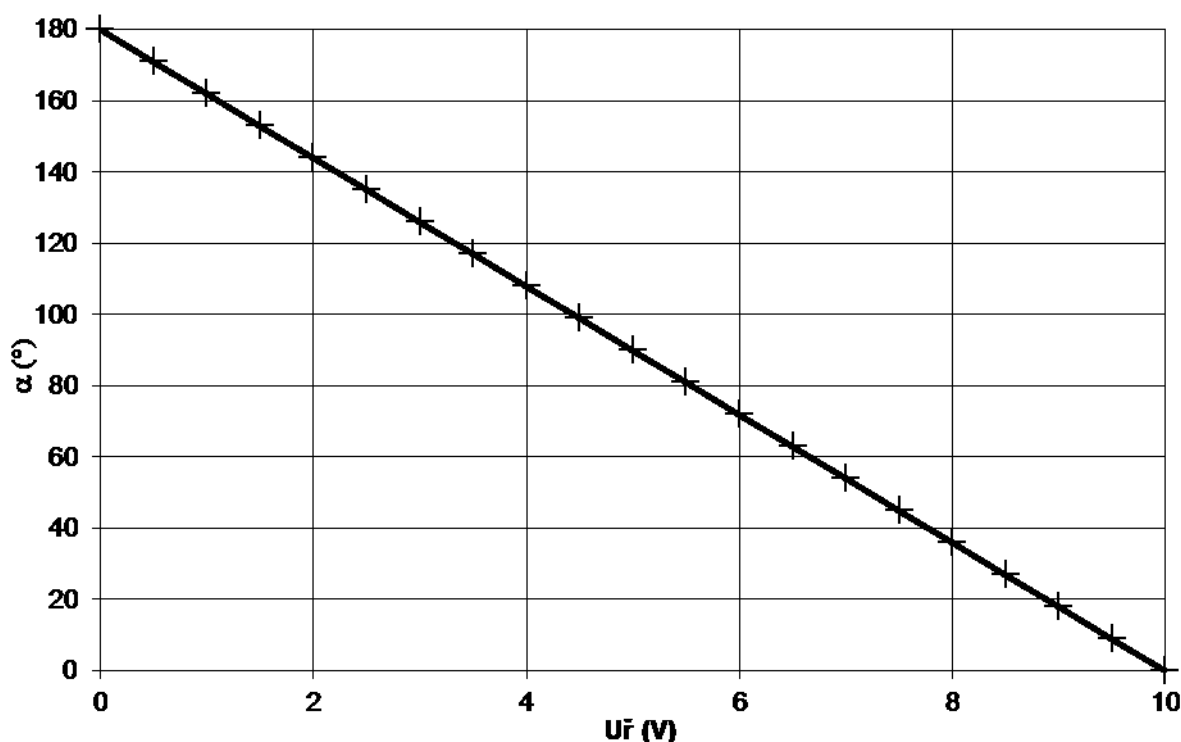
Obr. 38. Průběh (shora) napětí u_d a proudu i_d motorické zátěže při úhlu řízení $\alpha = 60^\circ$ (motor je zatížen), (pro i_d platí $I = 1,5A/d$ ilek)

Řízení usměrňovače pomocí dvou dvojitých impulsů za periodu s posuvem 0° se průběh proudu pro jednotlivé zátěže nemění. Ba naopak, je úplně stejný. Problém však nastává při velikosti α blízké hodnotě 180° . Na oba tyristory je poslán současně řídicí impuls, a to zapříčiní

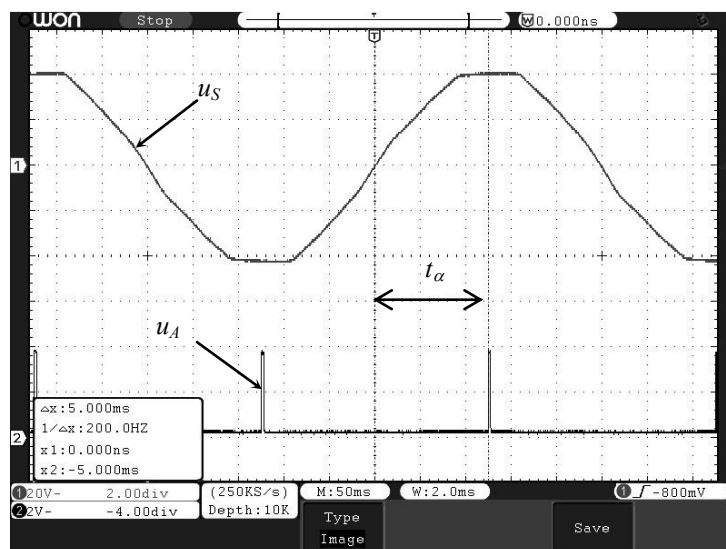
tzv. poruchu komutace. Řídicí impuls pak přesáhne dobu půlvlny a dojde ke spuštění tyristoru nechtěným způsobem. Můžeme tak vidět, že jednu půlvlnu reguluje správně (je tam viditelný úhel řízení) a přesáhnutím řídicího impulsu do druhé půlvlny periody dochází ke spuštění druhého tyristoru již od samého počátku půlvlny (tj. od α rovno 0°). Výsledné průběhy proudů a napětí na zátěžích jsou stejné jako u předchozího způsobu řízení. Jediný rozdíl tak nastává při vysokém úhlu řízení α , kdy už při 178° začne řídicí impuls přesahovat do druhé půlvlny.

Porovnáním obou způsobů zapalování tyristorů se více hodí způsob dvou samostatných impulsů posunutých o 180° . Druh tohoto řízení se často používal u elektrických svářecích aparatur s tyristorovou regulací proudu nebo u výkonových usměrňovačů, protože umožňoval plynulé řízení usměrňovače bez omezení řídicího úhlu α . Nebylo tedy potřeba dodržovat žádný bezpečnostní úhel γ a nehrozilo nebezpečí poruchy komutace. Na druhou stranu řízení pomocí dvou dvojíých impulsů s fázový posuvem 0° může ukázat onu zmíněnou poruchu komutace (nebo jinak nazváno případ selhání řízení). S tímto druhem vytváření zapalovacích impulsů lze také provádět řízení střídavého jednofázového měniče napětí s triakem, jinými slovy regulátor efektivní hodnoty střídavého napětí, se kterým lze jednoduše vytvořit obvod plynulého zvyšování napětí tzv. *softstart* (poznámka autora).

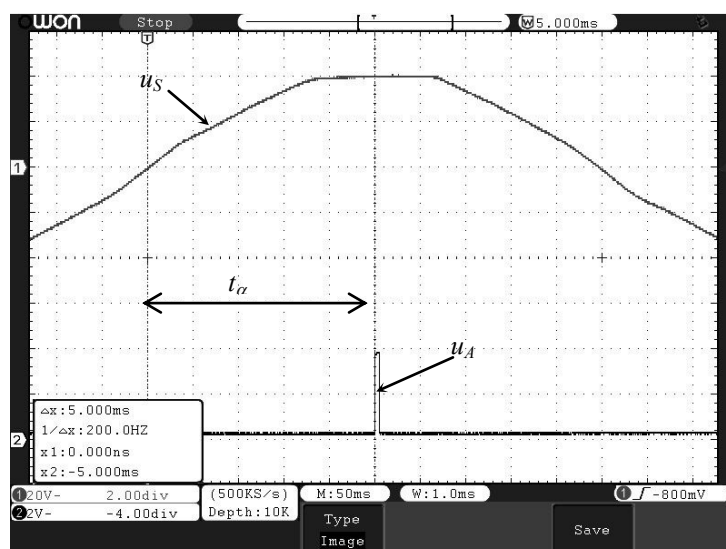
Charakteristika na obr. 39 udává závislost řídicího úhlu na velikosti řídicího napětí U_f . Jak z grafu vyplývá, úhel řízení se nastavuje pomocí stejnosměrného napětí v rozmezí 0V až 10V (standardní úrovně). V závislosti na tomto napětí se také lineárně mění velikost řídicího úhlu α .



Obr. 39. Převodní charakteristika řídicí jednotky závislosti řídicího úhlu α na řídicím napětí U_f



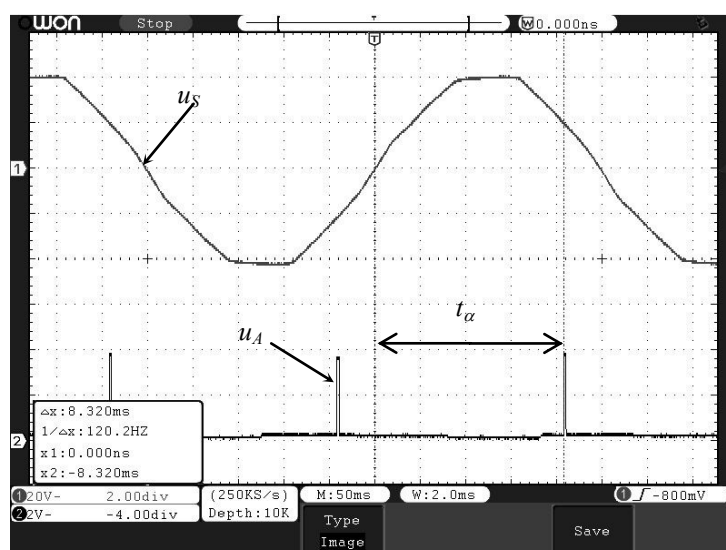
Obr. 40. Průběh (shora) synchronizačního signálu a výstupního signálu (kanál A) řídicí jednotky při úhlu řízení $\alpha = 90^\circ$



Obr. 41. Detail průběhu (shora) synchronizačního signálu a výstupního signálu (kanál A) řídicí jednotky při úhlu řízení $\alpha = 90^\circ$

Ověření výpočtem:

$$\alpha = kt_\alpha = \frac{180}{T} t_\alpha = \frac{180}{10 \cdot 10^{-3}} \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 90^\circ \quad (1.1)$$



Obr. 42. Průběh (shora) synchronizačního signálu a výstupního signálu (kanál A) řídicí jednotky při úhlu řízení $\alpha = 150^\circ$

Ověření výpočtem:

$$\alpha = kt_\alpha = \frac{180}{T} t_\alpha = \frac{180}{10 \cdot 10^{-3}} \cdot 8,32 \cdot 10^{-3} = 149,76^\circ \quad (1.2)$$

6 Výpočty pro určení konstant použitých v algoritmu softwaru:

Pro nastavení parametrů řídicí jednotky bylo nutno určit některé konstanty týkající se fázového řízení, např. jak dlouho trvá jeden řídicí stupeň (jinými slovy, kolik času potřebujeme k odpočítání jednoho stupně řídicího úhlu α) a podobně. Protože mikrokontrolér vykonává časově náročné výpočty, je zapotřebí program částečně zjednodušit. Všechny výpočty uvedené níže jsou myšleny pro síťovou frekvenci 50Hz.

Nejprve je zapotřebí zjistit délku půlvlny pro usměrněné napětí. To získáme ze známé frekvence, která je 100Hz. Potom

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{100} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ s} \quad (s; f) \quad (2.1)$$

Ze vztahu (2.1) získáme výslednou délku periody. Dále z tohoto vztahu (2.1) trvání periody usměrněného napětí získáme čas, jak dlouho bude trvat načasování jednoho stupně řídicího úhlu. Maximální rozsah řídicího úhlu α je 180° . Čili jeden stupeň bude trvat $t_{\alpha 1}$:

$$t_{\alpha 1} = \frac{T}{\alpha_{\max}} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{180} = 55,556 \cdot 10^{-6} \text{ s} \cdot \text{°}^{-1} \quad (s \cdot \text{°}^{-1}; s, \text{°}) \quad (2.2)$$

Režim časovače 1 a časovače 2 je nastaven na čítání hodinových pulsů z mikroprocesoru. Hodinový signál nejprve prochází předděličkou osmi a poté teprve vstupu je do časovačů. To znamená, že komparační registr musíme nastavit na hodnotu 55,556μs. Hodnotu získáme jednoduchým výpočty

Jedna perioda hodinového impulsu trvá t_T :

$$t_T = \frac{1}{f_{osc}} = \frac{1}{16 \cdot 10^6} = 62,5 \cdot 10^{-9} \text{ s} \quad (s; f) \quad (2.3)$$

Časovač se inkrementuje o jednu za dobu t_ϵ :

$$t_\epsilon = 8t_T = 8 \cdot 62,5 \cdot 10^{-9} = 500 \cdot 10^{-9} \text{ s} \quad (s; s) \quad (2.4)$$

Toto číslo se zdá být pěkně „kulaté“ a bude se s ním dobře pracovat. Pro další zpracování hodnoty $t_{\alpha 1}$ provedeme úpravu. Hodnotu 55,556μs zaokrouhlíme na 55,5μs. Tato malá úprava nikterak neohrozí přesnost regulace. Při maximálním řídicím úhlu 180° se vytvoří řídicí impuls o necelých 10μs dříve. Tato odchylka není tak kritická.

Do časovačů vložíme číslo n dané vztahem:

$$n = \frac{t_{\alpha 1}}{t_\epsilon} = \frac{55,5 \cdot 10^{-6}}{500 \cdot 10^{-9}} = 111 \quad (-; s, s) \quad (2.5)$$

Tyto uvedené výpočty jsou důležité pro správnou funkci programu a přesné řízení fáze spínání tyristorového řízeného usměrňovače.

7 Závěr:

V této práci byl popsán návrh a realizace číslicové řídicí jednotky pro řízení usměrňovače. Vytvoření algoritmu vhodného pro řízení tyristorů bylo snadné. Co však činilo nesmírné potíže, byla koncepce vhodného schématu zapojení a následné oživení řídicí jednotky. Vzhledem k faktu, že jsem neočekával tak velké zvlnění napájecí distribuční sítě, se vývoj jednotky komplikoval a sunul vpřed s určitými technickými obtížemi. Bylo nutno zajistit správnou synchronizaci řídicí jednotky, což nebylo tak jednoduché. Vzniklo celkem šest pracovních verzí řídicí jednotky a různé kombinace zajištění synchronizace. Zapojení vždy selhalo na synchronizaci, kdy průchod nulou vlivem rušení byl uskutečněn o stovky mikrosekund dříve, což úplně znemožnilo funkci časování (časovač ve vysokých hodnotách řídicího úhlu vynechával – počet vynechaných zapalovacích impulsů úměrně rostl se zvyšujícím se řídicím úhlem) při vysokých hodnotách řídicího úhlu. U poslední verze byl problém odstraněn rozdělením obou časovačů na spouštění podle polarizace synchronizačního signálu, takže tato koncepce má své opodstatnění, avšak kompenzované maximální funkčností jednotky.

Ovládací software řídicí jednotky byl vytvořen ve vývojovém prostředí *AVR Studio* [14] [15] [16] [17] [18]. Jako programovací jazyk jsem záměrně zvolil *assembler*, neboť touto cestou programování můžeme přímo mikroprocesoru nadiktovat, co konkrétně a jakým způsobem má provést. Máme tedy přesný přehled o tom, co se v mikroprocesoru odehrává. Tento fakt usnadňuje základní oživení programu a případné odhalování chyb, kterých byl při vývoji programu opravdu dostatek. Programový jazyk *assembler* má sice jednu podstatnou nevýhodu, a to vyšší počet programových řádků. Na rozdíl od ostatních typů jazyků (například jazyk *C*, *C++*, *Basic*) musí být každý pohyb v mikroprocesoru koordinován příkazem. Toto tedy vede ke psaní většího počtu řádků programu a tím je *assembler* i více časově náročný. Popis programu zde neřeším. Vzhledem k jeho náročnosti je uveden v příloze i s podrobným komentářem srozumitelným i pro laika. V programu jsou začleněny i výpočty pro nastavení jednotlivých časovačů podle aktuální hodnoty řídicího úhlu, které jsou pro procesor poměrně náročné. Proto jsou pro zjednodušení v programu zavedeny konstanty zjednodušující některé výpočty. To omezuje použití řídicí jednotky pouze pro aplikace v běžné distribuční síti s frekvencí 50Hz.

Návrhem a realizací řídicí jednotky jsem si mohl ověřit své teoretické znalosti v oblasti řízených usměrňovačů, které jsem znal pouze teoreticky z odborné literatury. Fyzickým sestavením řídicí jednotky jsem si tedy vyzkoušel problematiku řízení jednofázových usměrňovačů, které mohu dále používat ve své praxi v konstruování a navrhování dalších zařízení. Navíc jsem měl možnost zdokonalit své znalosti v oblasti nastavování a programování mikrokontrolérů, se kterými jsem začal pracovat teprve nedávno. Podle mého názoru je jednotka vyrobena jako univerzální, s možností dvojího ovládání řízeného usměrňovače. V jednom režimu umožní správné řízení usměrňovače v celém rozsahu úhlu řízení jednotky. V druhém režimu ovládání tyristorů pak lze ukázat problémy související s poruchou komutace. Režimy ovládání tak umožňují použít jednotku i pro jiné účely fázového řízení. Například pro ovládání střídavých měničů napětí s triakem, kde lze podobně elegantním způsobem měnit efektivní hodnotu napětí na zátěži. Věřím, že řídicí jednotka najde vhodné uplatnění při měření a řízení v laboratořích.

8 Seznam použité literatury:

- [1]. Holub, Přemysl a Zíka, Josef. *Praktická zapojení polovodičových diod a tyristorů*. Praha : SNTL, 1977.
- [2]. Vondrášek, František. *Výkonová elektronika, svazek 1, Přehled výkonových polovodičových součástek*. Plzeň : ZČU Plzeň, 1994. ISBN 80-7085-136-1.
- [3]. Häberle, Heinz a kolektiv. *Průmyslová elektronika a informační technologie*. Europa - Sobolátes, 2003. ISBN 80-86706-04-4.
- [4]. Tkotz, Klaus a kolektiv. *Průručka pro elektrotechniku*, Europa - Sobolátes, 2001. ISBN 80-86706-00-1.
- [5]. Vondrášek, František. *Výkonová elektronika, svazek 2, měniče s vnější komutací*. Plzeň : ZČU Plzeň, 1994. ISBN 80-7052-137-X.
- [6]. Arendáš, Miroslav a Ručka, Milan. *Amatérská elektronika v domácnostiva při rekreaci*. Praha : SNTL, 1985.
- [7]. Brandštetter, Pavel. *Technické prostředky pro řízení elektrických pohonů*. Ostrava : VŠB - TU Ostrava, 2005.
- [8]. Antošová, Marcela a Davídek, Vratislav. *Číslicová technika*. České Budějovice : Kopp, 2008. ISBN 978-80-7232-333-3.
- [9]. *Dokumentace k mikroprocesoru Atmel ATmega8 – 20PU*, [Online] Atmel. [Citace: 10. Únor 2013.], http://www.atmel.com/Images/Atmel-2486-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega8_L_datasheet.pdf.
- [10]. *Komplexní dvojbrany pro návrh filtrů*, [Online] [Citace: 23. Březen 2013.], <http://moryst.sweb.cz/elt2/stranky1/elt017.htm>.
- [11]. *Dokumentace k dekonéru BCD na sedmisegmentový displej*, [Online] [Citace: 14. Prosinec 2012.], <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/26915/TI/CD4543.html>.
- [12]. *Dokumentace k dekonéru BCD na sedmisegmentový displej*, [Online] [Citace: 14. Prosinec 2012.], <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/351465/ONSEMI/74HC245.html>.
- [13]. Palacký, Petr. *Mikropočítačové řídicí systémy I*. Ostrava : VŠB - TU Ostrava, 2004.

- [14]. Matoušek, David. *Práce s mikrokontroléry Atmel ATmega16*, Praha : Kopp, 2006, ISBN 80-7300-174-8
- [15]. Matoušek, David. *Práce s mikrokontroléry Atmel AVRAT90S*, Praha : Kopp, 2003, ISBN 80-7300-088-1
- [16]. ARadio: Konstrukční elektronika, Č. 1 (Únor 2010), Praha, AMARO, 2010, Ročně vychází šest čísel (poslední vydané číslo 5. 12. 2010. ISSN 1211-2557)
- [17]. ARadio: Konstrukční elektronika, Č. 5 (Únor 2006), Praha, AMARO, 2006, Ročně vychází šest čísel (poslední vydané číslo 5. 12. 2010. ISSN 1211-2557)
- [18]. ARadio: Konstrukční elektronika, Č. 1 (Únor 2007), Praha, AMARO, 2007, Ročně vychází šest čísel (poslední vydané číslo 5. 12. 2010. ISSN 1211-2557)

9 Seznam příloh:

9.1 Změřené průběhy:

Průběhy z reálného zapojení usměrňovacího polořízeného můstku s připojenými různými druhy zátěže (R, RL, motor) při různém úhlu řízení.

9.2 Návrh a realizace řídicí jednotky:

Schémata zapojení jednotlivých desek plošných spojů, včetně klišé plošných spojů s osazovacím plánem.

9.3 Software:

Kompletní výpis programu pro mikrokontrolér ATmega8 od firmy *Atmel*.